



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## ZKOUŠKY VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ PRO 3D TISK

TESTING OF SELECTED MATERIAL PROPERTIES FOR 3D PRINTING

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. František Čáslavský

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2019

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Bc. František Čáslavský

**ID:** 164251

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### Zkoušky vybraných vlastností materiálů pro 3D tisk

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se základními materiály pro FDM 3D tisk a prostudujte možnosti jejich využití pro různé typy jejich aplikací. Seznamte se s jejich procesními parametry a navrhnete zkoušky pro porovnání pevnosti výtisku s různými typy plnění, zejména pro tisk dekoračních a funkčních dílů pro automobilové veterány. Proveďte jejich teplotní a UV stárnutí a výsledky vyhodnoťte.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 21.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá 3D tiskem, materiály pro 3D tisk, jejich testováním a zjišťováním jejich parametrů. Cílem je porovnat vybrané materiály, určit jejich ideální tiskové parametry a podrobit je testům dle navržené metodiky s ohledem na mechanickou odolnost a odolnost vůči vnějším vlivům a následně vybrat ideální materiál či materiály pro tisk dostatečně kvalitních a odolných součástek a plastových dílů do automobilů, zejména pro reprodukci již nedostupných součástek do veteránů, dále pak například pro použití v motorsportu.

## **Klíčová slova**

3D tisk, testování materiálu, filament, 3D tiskárna, ABS, ASA, PET-G, PLA, plast, autodíly

## **Abstract**

*This thesis deals with 3D printing, materials used for 3D printing, testing of the materials and learning their real parameters. Goal of the thesis is comparing selected materials, executing series of mechanical test and selecting suitable material for printing high-quality plastic parts for use in automobiles, especially for reproduction of parts that are no longer made for oldtimers and for use in motorsport.*

## **Keywords**

*3D print, material tests, filament, 3D printer, ABS, ASA, PET-G, PLA, plastic, car parts*

### **Bibliografická citace:**

*ČÁSLAVSKÝ, F. Studium vybraných vlastností materiálů pro 3D tisk. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 71 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.*

## **Prohlášení**

*„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Studium vybraných vlastností materiálů pro 3D tisk jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.*

*Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.*

V Brně dne: **21. května 2019**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

*Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Vyroubalovi, PhD za odbornou pomoc, trpělivost, cenné rady a zejména můj specifický přístup při zpracování mé diplomové práce.*

*Dále děkuji Lukáši Pomykalovi za jeho dobré rady a podporu při testování.*

-

V Brně dne: **21. května 2019**

.....  
podpis autora

# Obsah

1.	Úvod.....	13
2.	3D tisk v automobilovém průmyslu .....	14
2.1	Technologie FDM .....	15
2.2	Proces 3D tisku .....	16
2.3	3D tiskárna .....	17
2.3.1	Anycubic 4MAX.....	17
2.3.2	Úpravy tiskárny.....	20
2.3.2.1	Uzavření tiskárny a osazení filtrem .....	20
2.3.2.2	Úprava firmwaru a tiskový server .....	25
3.	Vybrané materiály pro zkoušky .....	28
3.1	ABS .....	28
3.2	PLA .....	29
3.3	PET-G .....	30
3.4	ASA.....	31
4.	Stanovení ideálních tiskových parametrů .....	33
4.1	Teploty tisku.....	34
4.2	Rychlost tisku a retrakce .....	34
4.3	Orientace modelu při tisku .....	36
5.	Testování materiálů.....	38
5.1	Příprava vzorků .....	38
5.2	Rozměrová přesnost .....	42
5.3	Teplotní cyklování a namáhání UV zářením .....	44
5.4	Stanovení tahových vlastností.....	46
5.5	Test rázové houževnatosti materiálu .....	51
5.6	Vyhodnocení výsledků.....	57
5.6.1	ABS.....	58
5.6.2	ASA .....	59
5.6.3	PET-G .....	59
5.6.4	PLA HD .....	59
6.	Závěr .....	61

## Seznam symbolů a zkratk

### Zkratky:

3D	...	Tři dimenzionální
FDM	...	Fused deposition modeling
FFF	...	Fused filament fabricating
SLA	...	Stereolithografie
PLA	...	Kyselina poly-mléčná
ABS	...	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	...	Akrylonitril-styren-akryl
PET-G	...	Polyethylentereftalát – glykol
UV	...	Ultra fialové
NOS	...	New Old Stock



## Seznam obrázků

Obr. 2-1 Princip funkce tiskárny FDM [5] .....	16
Obr. 2-2 Stavebnice Anycubic 4MAX [6] .....	18
Obr. 2-3 Tiskárna Anycubic 4MAX [6] .....	20
Obr. 2-4 Vizualizace navrženého krytu tiskárny .....	21
Obr. 2-5 Horní kryt tiskárny 4MAX .....	22
Obr. 2-6 Porovnání použitého (vlevo) a nového uhlíkového filtru .....	24
Obr. 2-7 Nový kryt elektroniky s upraveným chlazením .....	25
Obr. 2-8 Prostřední Octoprint .....	26
Obr. 2-9 Kryt pro Raspberry Pi .....	27
Obr. 4-1 Testovací objekt 3DBenchy [13] .....	33
Obr. 4-2 Teplotní věž .....	34
Obr. 4-3 Test můstků .....	35
Obr. 4-4 Test retrakce .....	36
Obr. 4-5 Kalibrační kočka .....	36
Obr. 4-6 Vliv orientace tisku na deformace .....	37
Obr. 5-1 Zkušební těleso dle ČSN EN ISO 527-2 1BA - návrh .....	38
Obr. 5-2 Zkušební těleso dle ČSN EN ISO 527-2 1BA .....	39
Obr. 5-3 Orientace tisku zkušebních těles pro zkoušku tahových vlastností .....	39
Obr. 5-4 Přednostní zkušební těleso dle ČSN EN ISO 179 - návrh .....	40
Obr. 5-5 Přednostní zkušební těleso dle ČSN EN ISO 179 .....	40
Obr. 5-6 Orientace tisku vzorků pro zkoušku rázové houževnatosti .....	41
Obr. 5-7 Klimatická komora Weiss-Vötsch C340 .....	44
Obr. 5-8 Porovnání vzorků před a po namáhání UV zářením .....	45
Obr. 5-9 Směr tahu při zkoušce tahových vlastností .....	46
Obr. 5-10 Použitý tester – trhací lis STM 766 .....	47
Obr. 5-11 Umístění vzorku v testeru .....	51
Obr. 5-12 Tester Zwick Roell HIT50P .....	52
Obr. 5-13 Přeražené vzorky ABS .....	53
Obr. 5-14 Přeražené vzorky ASA .....	54
Obr. 5-15 Přeražené vzorky PET-G .....	55

Obr. 5-16 Přeražené vzorky PLA HD.....	56
--	----

## Seznam tabulek

Tab. 2-1 Parametry tiskárny Anycubic 4MAX.....	19
Tab. 2-2 Koncentrace částic při tisku různých materiálů [20] .....	23
Tab. 3-1 Výrobce u dané parametry ABS-T [9] .....	29
Tab. 3-2 Výrobce u dané parametry PLA HD [10] .....	30
Tab. 3-3 Výrobce u dané parametry PET-G [11] .....	31
Tab. 3-4 Výrobce u dané parametry ASA [12] .....	32
Tab. 3-5 Vybrané parametry testovaných materiálů .....	32
Tab. 4-1 Zjištěné parametry tisku materiálů .....	37
Tab. 5-1 Nastavení parametrů tisku vzorků .....	42
Tab. 5-2 Rozměrová přesnost vzorků natištěných ve směru 1 .....	43
Tab. 5-3 Rozměrová přesnost vzorků natištěných ve směru 2 .....	43
Tab. 5-4 Výsledky tahové zkoušky – pevnost v tahu .....	47
Tab. 5-5 Výsledky tahové zkoušky – přilnavost vrstev .....	49
Tab. 5-6 Porovnání výsledků tahových zkoušek .....	50
Tab. 5-7 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti ABS .....	52
Tab. 5-8 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti ASA .....	53
Tab. 5-9 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti PET-G .....	54
Tab. 5-10 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti PLA HD .....	55
Tab. 5-11 Porovnání výsledků všech materiálů .....	56
Tab. 5-12 Porovnání cen a vlastností materiálů .....	58

## Seznam grafů

Graf č. 1 Teplotní profil teplotního namáhání vzorků .....	43
Graf č. 2 Porovnání výsledků tahových zkoušek .....	50
Graf č. 3 Porovnání rázových houževnatostí všech materiálů .....	57

# 1. ÚVOD

3D tisk je proces, při kterém je z digitální předlohy vytvořen reálný trojrozměrný model. Tento proces je obecně nazýván jako aditivní technologie výroby, kdy je výrobek tvořen přidáváním materiálu. Ten je přidáván po vrstvách, až do dokončení výrobku. Na první pohled zřejmou výhodou této technologie je minimalizace odpadu a také tvorba tvarů, které by obráběním nebylo možné vytvořit.

Kořeny 3D tisku sahají do začátku 80. let 20. století, kdy se v Japonsku na výzkumném institutu v Nagoyi objevily první metody tvorby trojrozměrných modelů. V roce 1984 byla patentována technologie stereolitografie. Tato technologie funguje na principu vytvrzování jednotlivých vrstev fotopolymeru pomocí UV záření. Chuck Hull, tvůrce patentu, tento proces definoval jako „systém pro generování trojrozměrného objektu vytvořením vrstev – příčných řezů – formovaného objektu.“<sup>[1]</sup> Kromě tohoto patentu Chuck Hull vytvořil také soubor typu STL, slicing, tedy segmentování modelu na jednotlivé vrstvy, a také způsoby výplně, které jsou používány dodnes. V roce 1988 se objevila technologie FDM – Fused Deposition Modeling – která je v současnosti nejrozšířenější technologií tisku. I přes vývoj dalších tiskových technologií zůstával 3D tisk až do začátku druhého tisíciletí záležitostí pro firmy, zejména kvůli ceně a nízké dostupnosti tiskáren na trhu. V roce 2005 byl založen open source projekt RepRap, který si dal za cíl vyvinout levnou 3D tiskárnu, která bude schopna replikovat sebe sama. Účelem bylo dostat 3D tisk do rukou nadšenců a umožnit komukoli na planetě, aby měl svou vlastní tiskárnu, a měl možnost pomocí ní vytvořit jakýkoli předmět. Postupem času vzniklo mnoho variant RepRap tiskáren, z nichž nejznámější variantou je Prusa i3.

V roce 2009 vypršely patenty na technologii FDM a na trh přicházejí dostupné tiskárny od různých výrobců. Často jde o klony tiskárny Prusa i3 a jejich ceny v současnosti klesly až na jednotky tisícikorun.

V současnosti slouží 3D tisk zejména k rychlé a levné výrobě prototypů, malosériové výrobě, či personalizované výrobě. Použití ale nalézá i v případě výroby nedostupných náhradních dílů. V současné době se uplatňuje téměř ve všech odvětvích průmyslu a nejenom v něm. Své uplatnění našel i ve zdravotnictví a jeho využití najdeme i v umění. Zajímavostí, která se objevila v loňském roce jsou betonové 3D tiskárny, tedy tiskárny, které vytváří objekty z betonu.

## 2. 3D TISK V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

Ačkoli se může zdát, že i v automobilovém průmyslu se 3D tisk začal uplatňovat až s jeho popularizací, realita je taková, že při vývoji automobilů je používán už od druhé poloviny 90. let. Původně se 3D tisk uplatnil zejména při tvorbě modelů a funkčních prototypů součástek. V současnosti ale 3D tisk najdeme nejenom ve vývoji, ale i při podpoře výroby při tvorbě forem a fixtur, při tvorbě produkčních součástek. Novým trendem, který prezentovalo několik automobilek na Motor Show 2019 v Ženevě, je možnost přizpůsobení interiérů a doplňků za podpory 3D tisku.

Jedním z největších uživatelů 3D tisku je BMW, které v roce 2018 slavilo vytištění jednoho milionu součástek za poslední dekádu. Je ovšem nutné dodat, že nejde jen o plastové součástky, ale i o kovové. V produkčních a závodních vozech používá BMW vytištěné součástky od roku 2010, kdy začalo vyrábět menší série součástek zejména pro závodní vozy DTM. Později se součástky vytvořené pomocí 3D tisku objevily i ve vozech jako je Rolls-Royce. V současnosti v tomto luxusním automobilu najdeme více než 10 interiérových součástí, které byly vytvořeny pomocí 3D tisku. <sup>[3]</sup>

Dalším odvětvím, do kterého se 3D tisk teprve postupně rozšiřuje, je restaurování historických vozidel. Zejména plastové součástky, které časem stárnou a často ani není možné najít NOS náhrady, se velice těžko nahrazují a jejich reprodukce pomocí 3D tisku je často jediným způsobem, jak si je obstarat. Společnost Mercedes-Benz v roce 2018 oznámila program „Future meets Classic“ v rámci kterého začala svým zákazníkům nabízet součástky na historické Mercedesy vyrobené pomocí 3D tisku. Tyto součástky byly vymodelovány podle původní dokumentace a vytištěny. <sup>[4]</sup>

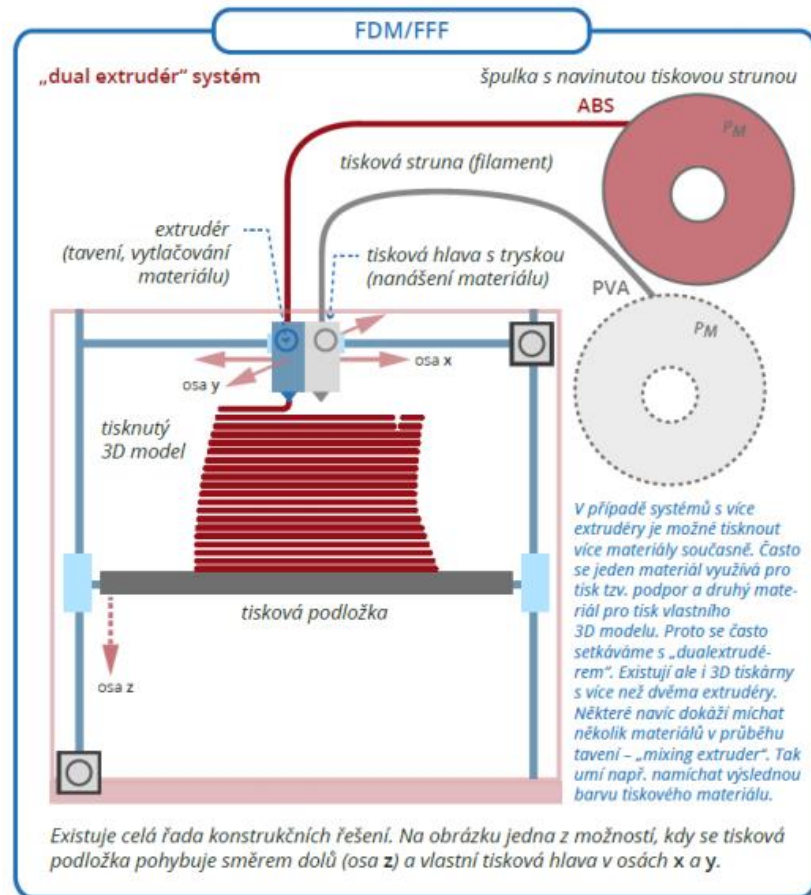
Jednou z hlavních výhod 3D tisku, kterou automobilky mimojiné propagují, je i možnost použití recyklovaných plastů. S průnikem 3D tisku do výroby automobilů vznikla i potřeba likvidace již nepoužitelných součástí, ať již forem, fixtur nebo jiných součástek. A například Seat v roce 2019 na veletrhu v Ženevě prezentoval použití 3D tisku a zejména použití recyklovaných plastů pro výrobu filamentu. K recyklaci využívá použité díly z výroby a vzhledem k tomu, že součástky musí být rozdrceny, tak lze tento proces použít i pro likvidaci prototypových součástek, pro které platí zvláštní režim likvidace.

Souhrnem se tedy dá říci, že 3D tisk a jeho průnik do většiny oblastí v automobilovém průmyslu je pozitivní trend, který může urychlovat vývoj, usnadňovat výrobu a v neposlední řadě i zlevnit případnou personalizaci vozu dle přání zákazníka. Možnost použití recyklovaných plastů je rozhodně také kladem.

## **2.1 Technologie FDM**

Technologie FDM, fused deposition modeling, popřípadě FFF, fused filament fabrication, je nejpoužívanější technologií 3D tisku. K její popularitě přispívá zejména nízká cena a dostupnost různých materiálů.

Funguje na principu extruze materiálu. Termoplast ve formě struny je protlačován extrudérem zahřátým na určitou teplotu a objekt je tvořen postupným nanášením vrstev. Tloušťka vrstvy při tisku je obvykle mezi 0,05 a 0,5 milimetry. Čím nižší je tloušťka vrstvy, tím přesnější a hladší je výsledek, ale samozřejmě s tím roste čas tisku a úměrně s časem tisku i jeho cena. Nejčastěji používanou tloušťkou při tisku je 200 mikronů. Při tisku je nutné používat podpory, nicméně je možné je tisknout z vodou rozpustitelného materiálu, v případě tiskárny se dvěma extrudéry. Výhodou této technologie je její rychlost a nízká cena. Tato práce se zabývá tiskem touto technologií.



**Obr. 2-1 Princip funkce tiskárny FDM [5]**

## 2.2 Proces 3D tisku

K tomu, aby mohl být vytištěn nějaký objekt, je potřeba mít jeho 3D model. Tento model je pak převeden do formátu STL nebo OBJ, aby jej mohl zpracovat software nazývaný slicer. Tento software slouží ke zpracování modelu, jeho rozdělení na jednotlivé vrstvy, v případě potřeby vygenerují podpory a následně vytvoří instrukce pro tiskárnu. Na trhu jsou volně dostupné různé programy, nepoužívanějšími jsou Cura, Simplify3D a Slic3r. Instrukce pro tiskárnu jsou ve formě gcode, který se používá i pro CNC obráběcí stroje.

Pro úspěšný tisk je důležitá správná volba parametrů tisku. Nejdůležitějšími parametry jsou teploty tisku a tloušťka vrstvy. Pro první vrstvu tisku jsou často nastavovány odlišné parametry z důvodu správného přilnutí k podložce. Podle druhu materiálu se pak liší teploty i rychlosti tisku. Důležité je také nastavení výplně, objekty



se málokdy tisknou plné, z důvodu úspory času a materiálu je vnitřek vyplněn danou mřížkou o dané hustotě. To také ovlivňuje výsledné vlastnosti výrobku.

Po tisku je potřeba výrobek dále opracovat. Většinou jde o odlomení podpůrných konstrukcí a povrchovou úpravu.

## **2.3 3D tiskárna**

3D tiskárna je zařízení umožňující 3D tisk. V současné době je na trhu velké množství tiskáren, většina z nich ale vychází z konstrukcí tiskáren RepRap. Nejrozšířenějším typem tiskáren je Prusa i3 a jeho klony. Tuto tiskárnu navrhl Josef Průša na základě modelu RepRap Mendel a následné modifikace Prusa-Mendel. U této konstrukce se tisková podložka pohybuje ve směru y a tisková hlava se pohybuje ve směru x a z.

Pro tisk vzorků byla využita tiskárna Anycubic 4MAX. Její parametry a popis úprav popisují následující kapitoly.

### **2.3.1 Anycubic 4MAX**

Tato tiskárna čínského výrobce Anycubic přišla na trh v dubnu roku 2018. Její cena se v závislosti na kurzu dolaru a eura pohybuje mezi šesti a sedmi tisíci korun. Ačkoli nabízí velice zajímavý poměr ceny a výkonu, netěší se takové oblibě jako ostatní tiskárny v portfoliu Anycubicu, které mají nižší pořizovací cenu. Začátkem roku 2019 byla výrobcem uvedena také varianta 4MAX Pro, která je plně uzavřená. Tato tiskárna je, stejně jako naprostá většina tiskáren, dodávána jako stavebnice.



**Obr. 2-2 Stavebnice Anycubic 4MAX [6]**

Samotná tiskárna je polouzavřená, její konstrukce je tvořena hliníkovými profily a rohovými díly z ABS. Tisková hlava této tiskárny se na rozdíl o tiskáren Prusa i3 pohybuje v ose x a y, tisková podložka se pohybuje v ose z. Rozměr tiskové podložky je 210 x 210 mm a maximální výška tisku je 300 mm. Tisková hlava je osazena hot endem MK8, tiskovou podložkou je Ultrabase™. Tiskárna je také osazena senzorem pro detekci filamentu, který v případě že filament dojde, přeruší tisk a umožní jeho výměnu. Další užitečnou vlastností tiskárny je funkce „power outage“. V případě přerušení napájení je možné tisk obnovit. Parametry tiskárny naleznete v tabulce 2-1.

Hlavní výhodou této tiskárny je její konstrukce. Díky tomu, že je polouzavřená, nedochází k deformaci tisků kvůli nerovnoměrnému ochlazování, při domácím používání způsobenému zejména průvanem. Také je schopna díky pevnosti konstrukce produkovat kvalitní tisky i při rychlostech až 80 mm/s.

Jako nevýhoda tiskárny by se dala označit její náročnost při opravě. Kabeláž tiskárny je totiž vedena v uzavřených svazcích a k desce je připojuje přes další konektory. V případě vadného termistoru na hot endu tiskárny je pak správný postup výměna celého hot endu včetně kabeláže, namísto výměny pouze vadného termistoru.

**Tab. 2-1 Parametry tiskárny Anycubic 4MAX**

	Anycubic 4MAX
Typ tiskárny	Polouzavřená
Materiál konstrukce	Hliník
Tloušťka filamentu	1,75 mm
Systém podávání filamentu	Bowdenový
Tiskový prostor (x,y,z)	210 x 210 x 300 mm
Počet extrudérů	1
Velikost trysky	0,4 mm
Maximální teplota extrudéru	250 °C
Maximální teplota podložky	110 °C
Maximální rychlost tisku	60 mm/s
Velikost vrstvy	0,1 - 0,4 mm
Přesnost v osách X, Y	0,0125 mm
Přesnost v ose Z	0,0025 mm
Kalibrace tiskárny	Manuální

Z tabulky parametrů tiskárny se zdá, že její výkon není nijak oslnivý, nicméně realita je taková, že výrobcem udané parametry nemají s realitou mnoho společného. Ačkoli je uvedeno, že systém podávání filamentu je bowdenový, jde o takzvaný direct-drive extrudér, ke kterému je filament podáváný skrze bowden. V případě bowdenového systému by byl motor extrudéru umístěn na konci bowdenu a filament protlačoval skrze bowden do hot endu. Stejně tak udaná maximální teplota extrudéru je nízká, reálně je hot end MK8 schopen bezpečného tisku při teplotách až 270 stupňů. Při vyšších teplotách může dojít k degradaci a poškození teflonové trubice v hot endu a následnému ucpání. Výrobce také udává maximální rychlost tisku až 60 mm/s, se standardním firmwarem je ale možný tisk až rychlostí 80 mm/s a s upraveným firmwarem a vhodným nastavením tisku není problém dosáhnout rychlostí až 120 mm/s.



**Obr. 2-3 Tiskárna Anycubic 4MAX [6]**

## **2.3.2 Úpravy tiskárny**

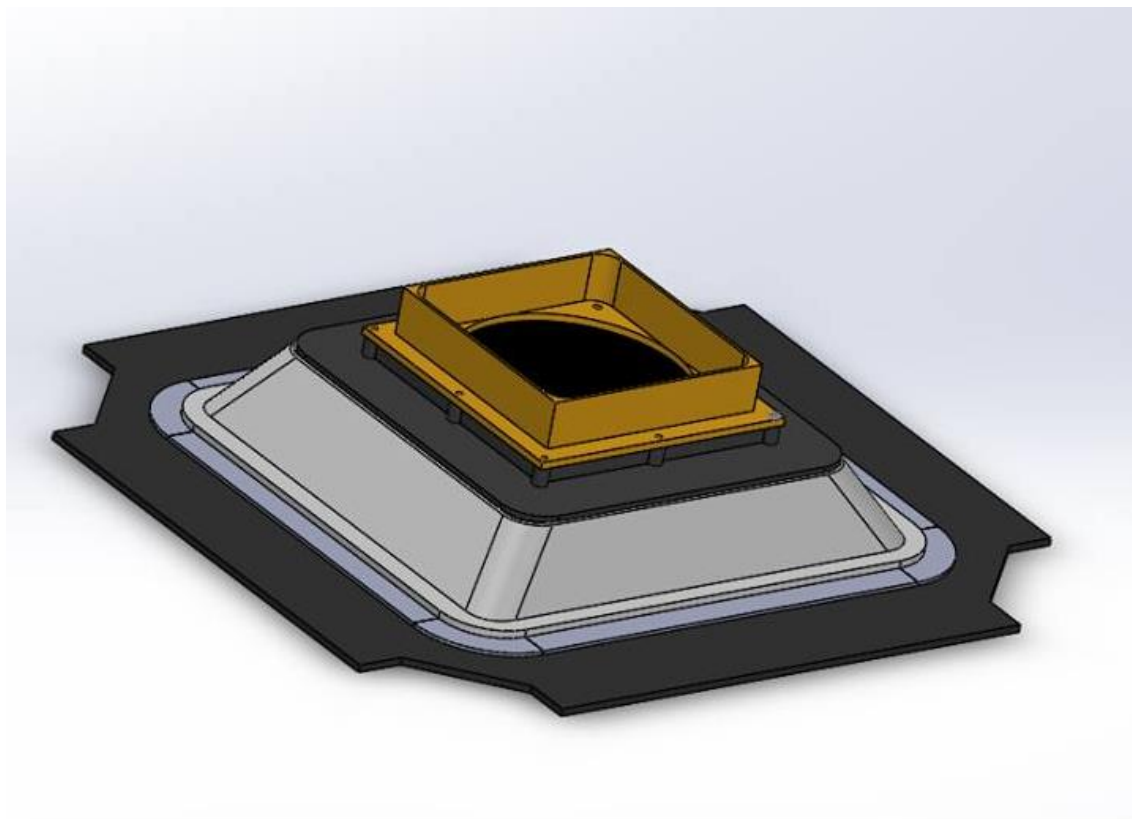
Tiskárna byla v rámci snahy o dosažení lepší kvality tisku a vyššího pohodlí při ovládání dále modifikována. Šlo o úpravu tiskárny na plně uzavřenou, modifikaci firmwaru tiskárny a zřízení tiskového serveru.

### **2.3.2.1 Uzavření tiskárny a osazení filtrem**

Úprava tiskárny na plně uzavřenou zahrnovala v prvním kroku úpravu vedení kabeláže a bowdenu. Pro zamezení lámání kabelů byly použity modely z databáze [www.thingiverse.com](http://www.thingiverse.com) uživatele Coat. [7,8] K protažení bowdenu dovnitř tiskárny a úpravě vedení kabeláže k motoru osy X a extrudéru byly navrženy vlastní součástky. Jde o průchodku s držákem senzoru filamentu a hrazdu umístěnou na vodících tyčích osy Z, která zabraňuje kabelům a bowdenu v interferenci s pohyblivými částmi tiskárny.

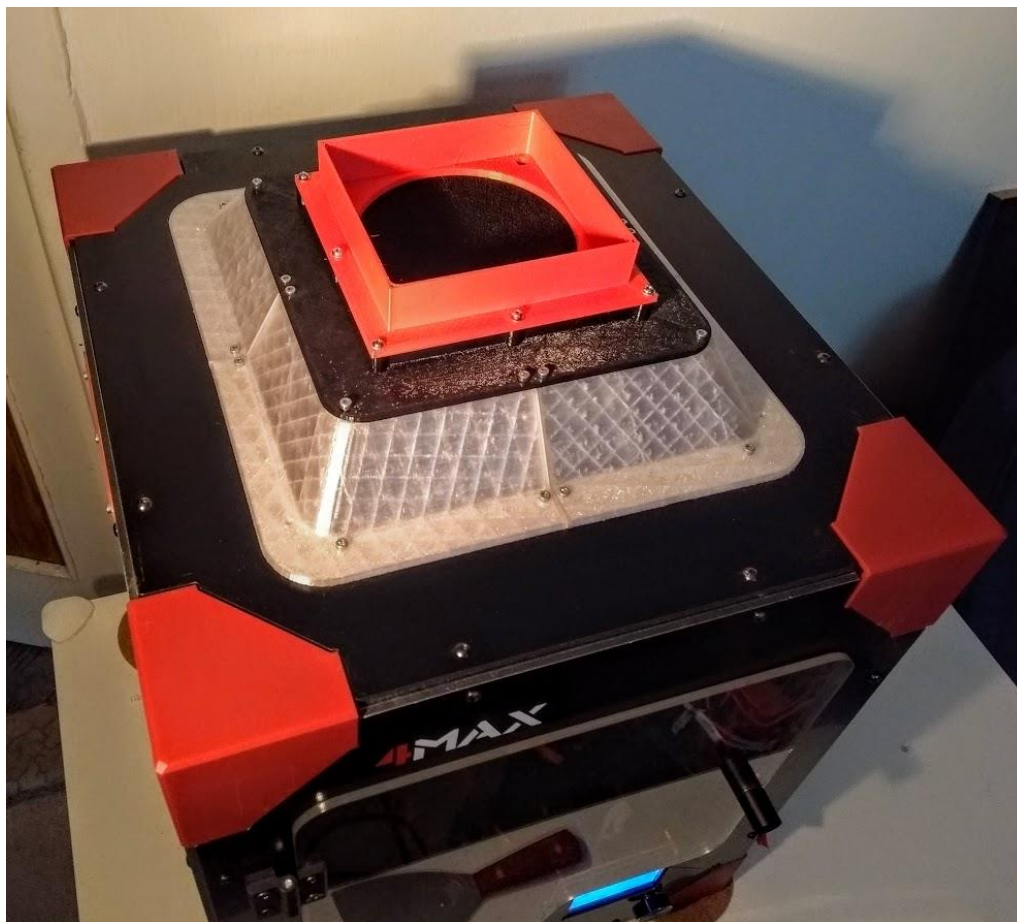
Dalším krokem bylo osvětlení prostoru tiskárny. Po uzavření tiskárny by došlo k situaci, kdy by uvnitř byla naprostá tma, což je pro kontrolu stavu tisku i manipulaci uvnitř nežádoucí. Původním záměrem bylo opět použít model držáku LED pásku

z thingiverse, ale kvůli jeho špatným rozměrům byl navržen vlastní držák. Pásek je možné spínat spínačem umístěným na tiskárně a alternativně pomocí tiskového serveru.



**Obr. 2-4 Vizualizace navrženého krytu tiskárny**

Finálním krokem pak bylo vytvoření krytu vrchu tiskárny. Tento díl byl navržen s možností odtahu vzduchu z tiskárny pomocí větráku o průměru 120 mm a osazen uhlíkovým filtrem o straně 130 mm, jehož účelem je zamezení výparů z tiskárny. Navržen byl také tak, aby jej bylo možné úplně vytisknout na tiskárně. Kvůli tomu byl rozdělen dohromady do desítky dílů. Ty jsou k sobě spojeny pomocí šroubových spojení, kdy matice jsou nalisovány do dílů. Díky uzavření tiskárny je uvnitř udržována vyšší teplota, je dále omezen průvan a tím i zamezeno nechtěnému ochlazení dílů. To má kladný vliv na kvalitu tisku.



**Obr. 2-5 Horní kryt tiskárny 4MAX**

Osazení krytu tiskárny uhlíkovým filtrem má také své opodstatnění. Při tepelném zpracování plastů totiž dochází nejenom ke vzniku výparů neboli těkavých organických látek, ale také k uvolňování ultra jemných částic. Tyto výpary a částice vznikají zcela nekontrolovaně a mohou mít neblahý dopad na lidské zdraví, ovšem na jejich emise při tisku není i přes rozšíření 3D tiskáren do domácností brán příliš velký zřetel.

V případě výparů jde o těkavé organické látky, to je jakákoli organická sloučenina nebo směs organických sloučenin, s výjimkou metanu, která má při teplotě 20 °C tlak par 0,01 kPa nebo více a má odpovídající těkavost za konkrétních podmínek jejího použití. [zdroj]. Tyto látky mohou být jako organického původu, tak syntetické, a mají v praxi široké použití. Člověk je vnímá jako zápach a mohou být toxické či karcinogenní, v tom případě na ně může lidský organismus reagovat podrážděním, bolestí hlavy či nevolností a v krajním případě i poškozením orgánů. [zdroj] V případě ultra jemných částic se jedná o částice o průměru menším než 100 nm. Ty mohou díky jejich malé velikosti pronikat do lidského organismu, skrze plicní membrány se dostat do krevního oběhu a usazovat se v různých orgánech a způsobovat kardiovaskulární či respirační onemocnění.

Výrobci filamentů často v případě některých materiálů v bezpečnostním listu uvádějí, že tisk by měl probíhat v dobře větrané místnosti, ale v praxi je toto často málokdy dodržováno, neboť při přílišném větrání a tisku v otevřené tiskárně dochází k nerovnoměrnému ochlazování tisku a jeho deformacím.

Této problematice je celkově věnována poměrně malá pozornost a existuje pouze několik studií, které zkoumají vznik těkavých látek a ultra jemných částic. Jedna z těchto mála studií byla provedena Ohhunem Kwonem v univerzitě v Soulu, kde byly provedeny měření emisí ultra jemných částic z 3D tiskárny v uzavřené komoře a porovnány emise při tisku různých materiálů. Hodnoty zjištěné v této studii jsou shrnuty v tabulce 2-2. Z této tabulky vidíme, že největší emise ultra jemných částic vznikají při tisku materiálů HIPS a Nylon. <sup>[20]</sup>

**Tab. 2-2 Koncentrace částic při tisku různých materiálů [20]**

Materiál	Ultra jemné částice [# /cm <sup>3</sup> ]			Celková koncentrace částic [# /cm <sup>3</sup> ]		
	Před tiskem	Během tisku	Po tisku	Před tiskem	Během tisku	Po tisku
HIPS	621	210036	1910	988	217925	2631
Nylon	677	203368	2085	978	212654	2632
ABS 1	664	18107	1205	1093	20618	1792
ABS 2	777	11553	1140	1094	14131	1558
PLA	843	1050	811	1232	1468	1191
PVA	706	1034	683	1068	1591	1085

U těkavých látek je otázkou, jaký je jejich vliv na lidský organismus. V případě Styrenu, který se používá k výrobě ABS, je známo, že se jedná o možný karcinogen. Naopak v případě laktidu, který slouží k výrobě materiálu PLA, není známo, že by šlo o jakkoli toxickou látku. Tato problematika je velice zajímavá a v rámci omezení dopadů 3D tisku na lidské zdraví by bylo dobré, aby proběhl výzkum i na toto téma a s jeho výsledky byla seznámena široká veřejnost.

V další iteraci návrhu horního krytu bude počítáno s osazením nejenom uhlíkovým filtrem, ale také HEPA filtrem. Tím bude dosaženo optimální filtrace nejenom těkavých látek, ale také ultrajemných částic. Z dosavadního provozu upravené tiskárny bylo zjištěno, že komfort v místnosti s tiskárnou značně vzrostl a došlo k omezení většiny pachů při tisku. Lze tedy říci, že uhlíkový filtr při filtraci potenciálně zdraví škodlivých výparů vznikajících při tisku některých materiálů funguje. Jeho vliv je ale nezměřený,



jako důkaz jeho funkčnosti slouží jeho charakteristické zašednutí, které vzniká při jeho reakci s výpary a subjektivní pocit uživatele. Na obrázku 2-6 je porovnání měsíc používaného a nového filtru. Je vidět zřetelné zašednutí použitého filtru.



**Obr. 2-6 Porovnání použitého (vlevo) a nového uhlíkového filtru**

Další úpravou, která následovala po uzavření tiskárny byla úprava chlazení řídicí desky, která je umístěna uvnitř tiskárny. Začalo docházet k jejímu přehřívání, kdy standardní větrák určený k chlazení nebyl schopný odvádět dostatek teplého vzduchu. Byl navržen upravený kryt elektroniky s 80 milimetrovým větrákem, který naopak přivádí studený vzduch do krabice s řídicí elektronikou a teplý vzduch je vyveden tím samým krytem okolo. Po jeho instalaci přehřívání a následné vypínání tiskárny naprosto zmizelo.



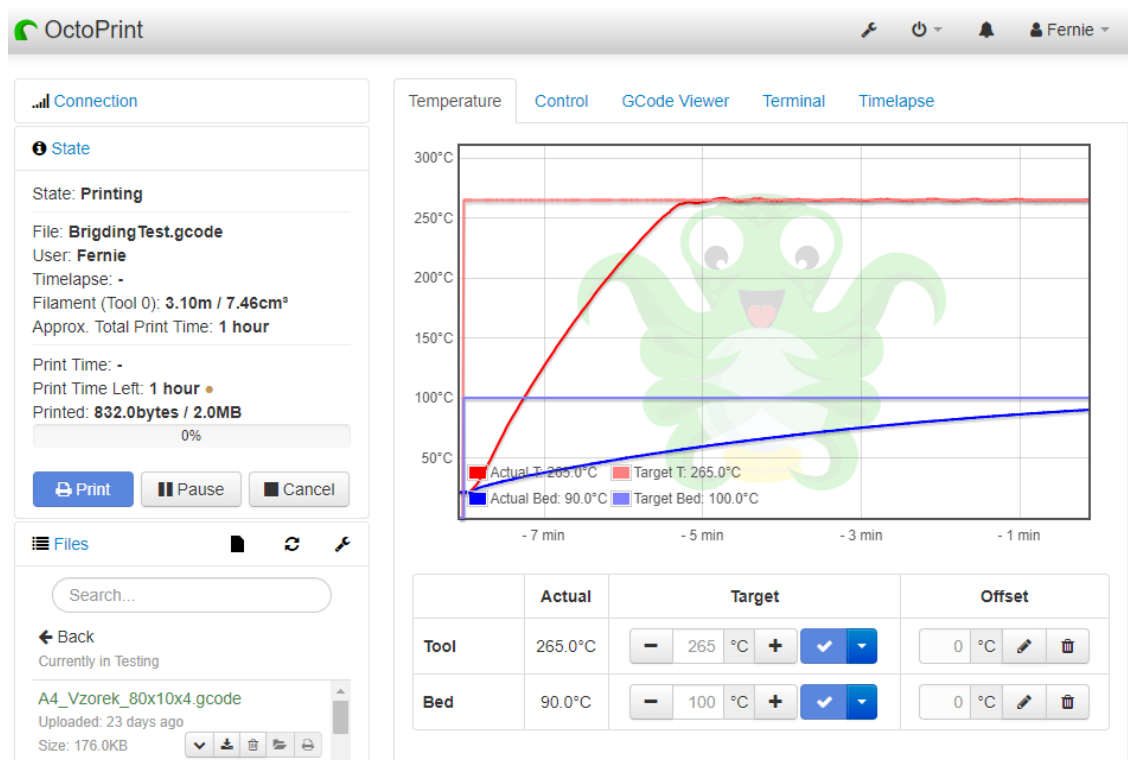


**Obr. 2-7 Nový kryt elektroniky s upraveným chlazením**

#### **2.3.2.2 Úprava firmwaru a tiskový server**

Úprava firmwaru zahrnovala výměnu standardního firmwaru za Marlin 1.1.9 upravený pro tiskárnu 4MAX a jeho další modifikace zahrnující vypnutí funkce obnovení tisku a přidání funkce „mesh bed leveling“, která slouží ke kalibraci výšky trysky vůči tiskové podložce. Výhodou tohoto firmwaru je možnost upravit jej i pro použití alternativních extrudérů či driverů motorů.

Posledním krokem, který zvyšuje zejména pohodlí obsluhy tiskárny je instalace tiskového serveru Octoprint. Ten běží na mikropočítači Raspberry Pi 3 B+, s tiskárnou je propojen pomocí USB kabelu a je připojen přes Wi-Fi do sítě. Je k němu tedy možné přistupovat vzdáleně, při připojení kamery je také možné vzdáleně sledovat stav tisku.



**Obr. 2-8 Prostřední Octoprint**

Na obrázku 2-8 je zobrazeno prostředí Octoprintu, ke kterému se přistupováno skrze webový prohlížeč. Na levé straně se nachází box, který zobrazuje stav tiskárny, respektive stav probíhajícího tisku, pod tímto boxem je prohlížeč souborů, které jsou nahrány na server a je možno je tisknout. Největší box na obrázku zobrazuje graf teplot extrudéru (červená barva) a tiskové podložky (modrá barva). Dále je možné tyto teploty měnit, popřípadě v dalších záložkách dále ovládat tiskárnu, či podívat se na obraz z připojené kamery.

Pro Raspberry Pi, na kterém běží tiskový server Octoprint, byl také navržen obal. Jeho součástí je i chlazení vzduchem, kde byl využit větrák původem z tiskárny. Tento obal byl vytištěn tak, aby nebyla nutná žádná jeho ruční úprava a s perfektní rozměrovou přesností.



**Obr. 2-9 Kryt pro Raspberry Pi**

### 3. VYBRANÉ MATERIÁLY PRO ZKOUŠKY

Materiály pro technologii tisku FDM jsou dodávány ve formě tiskové struny navinuté na cívku. Tyto struny jsou jinak nazývány filamenty. Používány jsou dvě tloušťky filamentů, 1,75 mm a 2,85 mm. Ve většině domácích tiskáren se prosazují filamenty o tloušťce 1,75 mm, pouze někteří výrobci se drží filamentů o tloušťce 2,85 mm. Jednotlivé materiály vybraný vzorek a jeho vlastnosti jsou popsány v následujících podkapitolách. Srovnání výrobci udaných vlastností materiálů jsou v tabulce č. 3-5.

#### 3.1 ABS

ABS označuje polymer Akrylonitrilbutadienstyren. Tento materiál byl jeden z prvních, které byly použity v průmyslovém 3D tisku. Vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi a nízkou cenou. Z tohoto materiálu jsou v praxi vyráběny například nárazníky automobilů, respektive jejich plastové kryty, nebo kostky stavebnice Lego. Už kvůli jeho rozšířenému použití je dále v testech materiálů použit jako referenční a ostatní materiály jsou s ním porovnávány.

Co se jeho mechanických vlastností týká, má dobrou odolnost vůči nárazu a otěru. Jeho tepelná odolnost je kolem 98 °C. Díky své dobré odolnosti vůči UV záření je to vhodný materiál pro venkovní použití.

Nevýhodou tohoto materiálu je jeho vysoké tepelné pnutí, při tisku má sklony se hodně kroutit, k tisku je vyžadována vyhřívaná podložka, v ideálním případě i uzavřená tiskárna. Dalším důsledkem tepelného pnutí a následného smršťování je nižší přesnost rozměru součástky. ABS navíc při tisku uvolňuje zápach a výpary z něj mohou být zdraví škodlivé.

K testování byl vybrán filament ABS-T české firmy Plasty Mladeč. Tento materiál aditivován za účelem snížení smrštivosti. Jeho povrch je na rozdíl od běžného ABS lesklý. Díky tomu je snáze tisknutelný, přitom si zachovává velmi dobré mechanické vlastnosti ABS. Plasty Mladeč nabízí také obyčejné ABS pod obchodním názvem ABS NOT DEAD.

Výrobce udané parametry tisku:

Teplota extruderu: 230–250 °C

Teplota podložky: 110 °C

**Tab. 3-1 Výrobce udané parametry ABS-T [9]**

	Metoda testování	Jednotka	Obvyklá hodnota
Modul pevnosti v ohybu	ISO 178	MPa	2000
Hustota	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1,08
Nárazová pevnost	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	20
HDT	ISO 75	°C	97

## 3.2 PLA

Polymer vytvořený kyselinou polymléčnou je nejpopulárnějším materiálem pro 3D tisk. Je to zejména z důvodu jeho snadné tisknutelnosti, nevyžaduje vysoké teploty, k tisku není potřeba vyhřívaná podložka. Je také velice levný, má obстойné mechanické vlastnosti. Vzhledem k tomu, že se vyrábí z kukuřičného škrobu, tak je označován za nejšetrnější materiál pro 3D tisk a často je inzerován jako biologicky rozložitelný a kompostovatelný. Ke svému rozložení ale vyžaduje kompostování za vyšších teplot, takže jej není možno likvidovat kompostováním v běžných kompostech. Jako výhodu lze i brát, že některé filamenty PLA jsou při tisku cítit trochu jako popcorn.

Nevýhodou tohoto filamentu je jeho nízká teplotní odolnost (kolem 60 °C), vysoká nasákavost a velmi nízká odolnost vůči UV záření. Je tedy vhodný spíše pro testovací a kalibrační objekty, popřípadě pro výrobky, které jsou vhodné pro použití ve vnitřních prostorech.

Existují modifikace tohoto materiálu, nejčastěji označovaná jako PLA-HD nebo PLA PRO, která odstraňují některé jeho nevýhody, zejména jeho teplotní odolnost. Tyto materiály mohou být odolné až do teplot kolem 150 °C. Po vytištění ale vyžadují vytvrzení v peci.

Nabídka teplotně odolných PLA filamentů není v České republice moc široká. K testování byl vybrán materiál PLA HD polské firmy Fiberlogy. Ta uvádí, že jde o biologicky rozložitelný materiál, který má lesklý povrch a po jeho vytvrzení v peci jde o materiál s podobnými vlastnostmi jako ABS. Vytvrzení probíhá v peci vyhřáté na teplotu

80 °C, kde má být výtisk umístěn na 15 minut. Poté by měl být teplotně odolný až do teploty 140 °C.

Výrobce udané parametry tisku:

Teplota extruderu: 200–220 °C

Teplota podložky: 50–70 °C

**Tab. 3-2 Výrobce udané parametry PLA HD [10]**

	Metoda testování	Jednotka	Obvyklá hodnota (před vytvrzením)	Obvyklá hodnota (po vytvrzení)
Modul pružnosti v tahu	ISO 527	MPa	3650	3710
Pevnost v tahu při přetržení	ISO 527	MPa	45	51
Pevnost v ohybu	ISO 178	MPa	90	93
Modul pevnosti v ohybu	ISO 178	MPa	3430	3435
Prodloužení v tahu	ISO 527	%	2,7	2,4
Hustota	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1,24	1,25
Nárazová pevnost	ISO 179-1	kJ/m <sup>2</sup>	11	20
HDT	ISO 75	°C	80	144

### 3.3 PET-G

PET-G je glykolem modifikovaný polyetylentereftalát, který se používá například k výrobě lahví. Tento materiál se vyznačuje pružností, odolností vůči vodě a dá se říci, že je dobrým kompromisem mezi PLA a ABS.

Jeho výhodou je nízká smršťivost a dobrá přilnavost k podložce, pěkný a hladký povrch. Mechanická odolnost PET-G je téměř na úrovni ABS, jeho teplotní odolnost je ale nižší, kolem 75 °C. Dále se vyznačuje velkou chemickou odolností. Tento materiál je velice těžké naleptat a je označován jako bezpečný pro potravinářské použití, například na odměrky, dózy, kontejnery a podobné.

Nevýhodou PET-G je zejména častý vznik „vlásků“ na objektu při tisku. Vytisknutý objekt tedy většinou vyžaduje další opracování. Tento problém se dá do jisté míry řešit vhodným nastavením retrakce filamentu při tisku.

PET-G je prodáváno v mnoha modifikacích. Častou úpravou je přidání částí uhlíkových vláken za účelem zvýšení pevnosti materiálu a jeho mechanické odolnosti. Další častou úpravou je obohacení materiálu o samozhášivá aditiva.

K testu byl vybrán filament PET-G od firmy Plasty Mladeč.

Výrobce udané parametry pro tisk:

Teplota extruderu: 230–250 °C

Teplota podložky: 60–80 °C

**Tab. 3-3 Výrobce udané parametry PET-G [11]**

	Metoda testování	Jednotka	Obvyklá hodnota
Modul pevnosti v ohybu	ISO 178	MPa	1880
Hustota	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1,27
Nárazová pevnost	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	11
HDT	ISO 75	°C	70

### 3.4 ASA

Tento materiál, nazývaný akrylonitril-styren-akryl, byl vyvinut jako alternativa ABS. Oproti ABS se vyznačuje vyšší odolností vůči UV záření a vyšší odolností vůči povětrnostním podmínkám. Zejména proto je lepší volbou než ABS pro venkovní aplikace. Je také více teplotně stálé a netrpí tolik smršťováním při tisku. Stejně jako ABS našel široké použití v automobilovém průmyslu.

Jeho hlavní nevýhodou je vyšší cena, vyžaduje také vyšší teplotu extruderu. Při jeho tisku se stejně jako u ABS mohou uvolňovat výpary, které jsou zdraví škodlivé.

Stejně jako u teplotně odolného PLA je nabídka filamentů ASA v České republice úzká. K testu byl tedy vybrán opět filament české produkce od firmy Fillamentum.

Výrobce udané parametry pro tisk:

Teplota extruderu: 240–255 °C

Teplota podložky: 90-105 °C

**Tab. 3-4 Výrobce udané parametry ASA [12]**

	Metoda testování	Jednotka	Obvyklá hodnota
Modul pružnosti v tahu	ASTM D638	MPa	1726
Pevnost v tahu	ASTM D638	MPa	45
Pevnost v ohybu	ASTM D790	MPa	62
Modul pevnosti v ohybu	ASTM D790	MPa	1814
Prodloužení v tahu při přetržení	ASTM D638	%	35
Hustota	ASTM D792	g/cm <sup>3</sup>	1,07
Nárazová pevnost	ASTM D256	J/m	441
HDT	ASTM D648	°C	86

**Tab. 3-5 Vybrané parametry testovaných materiálů**

	ABS-T	PLA HD	PETG	ASA
Modul pevnosti v ohybu [MPa]	2000	3435	1880	1726
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1,08	1,25	1,27	1,07
Nárazová pevnost [kJ/m <sup>2</sup> ]	20	20	11	-
HDT [°C]	97	144	70	86

Z tabulky 3-5 vyplývá, že teoreticky by nejlépe hodnoceným materiálem mělo být PLA HD. Má nejvyšší modul pevnosti v ohybu, i nárazovou pevnost a teplota skelného přechodu je také nejvyšší. Je ovšem otázkou, jak tyto hodnoty obstojí při testování. Výrobci sice v technických listech uvádějí obvyklé hodnoty i metody, pomocí nichž byly parametry určeny, neuvádějí ovšem specifikace testovacích objektů. Problémem ale je odlišné množství informací, které poskytují. Plasty Mladeč ve svých technických listech uvádějí pouze nezbytné minimum a chybí například pevnost v tahu. Výrobce Fillamentum své materiály testuje podle normy ASTM, které se od normy ISO odlišuje v některých parametrech testů a zejména testovacích objektech. Proto také nelze do tabulky 3-5 zařadit hodnotu nárazové pevnosti, neboť při testování metodou ASTM je udávána v jiném rozměru. Díky nedostatečné specifikaci ostatních parametrů testů lze tedy při porovnání hodnot udaných výrobcem a naměřených hodnot očekávat i velké rozdíly.



## 4. STANOVENÍ IDEÁLNÍCH TISKOVÝCH PARAMETRŮ

Každý materiál má výrobcem udaný rozsah teplot a v některých případech i doporučené rychlosti tisků. Konkrétní nastavení ale záleží na tiskárně, jejím provedení, typu extrudéru a tiskové podložce. Pro určení těchto nastavení existuje mnoho druhů testovacích objektů, neznámější je nejspíš „3DBenchy“ což je model loď, který prověří tisk negativně skloněných stěn, mostků a lze na něm experimentovat i s rychlostí a teplotami (obrázek 4-1). Existují ale i další testovací objekty, které sice nejsou tak zábavné, ale mají mnohem lepší vypovídající hodnotu. Pro určení optimálních tiskových parametrů byly použity teplotní věže<sup>[14]</sup> (obrázek 4-2), test tisku můstků (obrázek 4-3), test retrakce (obrázek 4-4) a kalibrační kočky<sup>[15]</sup> (obrázek 4-5).



**Obr. 4-1 Testovací objekt 3DBenchy [13]**

## 4.1 Teploty tisku

Ačkoli je možné materiály tisknout v určitém rozmezí teplot, pouze při určité teplotě dojde k ideálnímu spojení vrstev a tím dosažení největší možné pevnosti modelu. Ke zjištění ideální teploty tisku slouží objekt nazvaný „temperature tower“ neboli teplotní věž. Ta se skládá z jednotlivých segmentů, které jsou postupně natištěny různou teplotou, nejčastěji je používán krok 5 °C. Po vytištění testovacího objektu lze pohledem vyhodnotit při jaké teplotě dochází k nejlepšímu výsledku. U každého materiálu bylo vytištěno pět teplotních věží a určeny ideální teploty. Ty jsou shrnuty v tabulce 4-1.



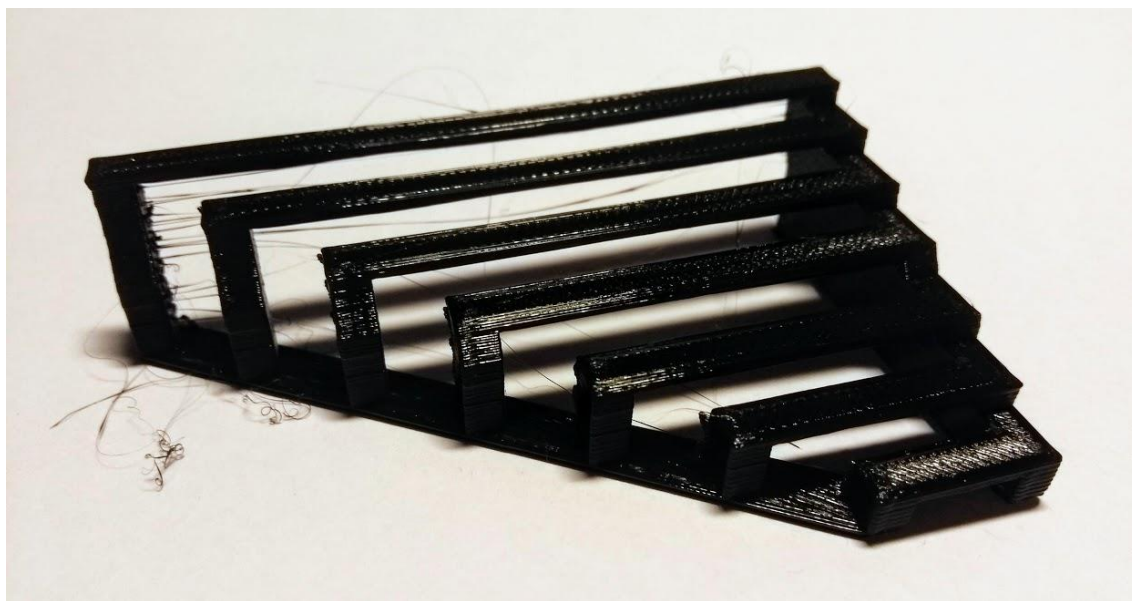
Obr. 4-2 Teplotní věž

## 4.2 Rychlost tisku a retrakce

Rychlost je jeden z parametrů, který zásadně ovlivňuje kvalitu a dobu trvání tisku. Druhým parametrem je tloušťka vrstvy. Obecně je možné říct, že čím detailnější tisk, tím pomalejší by měl být. Nejvyšší možnou rychlost tisku, při které ještě nedochází k deformacím či jinému defektu výtisku, ovlivňuje také konstrukce tiskárny, zejména její pevnost, dále motory a jejich drivery. Zásadním je také použitý materiál a chlazení výtisku při tisku. V případě, že při vysoké rychlosti tisku není možné materiál dostatečně ochladit, dochází k vnitřnímu pnutí materiálu a deformaci některých hran a ploch, v krajním případě i k odlepení modelu z tiskové podložky.

Vzhledem k tomu, že použitá 3D tiskárna v době realizace práce byla již několik měsíců používána, byly už vytvořeny tiskové profily pro několik úrovní detailu, tloušťky vrstvy a rychlosti tisku, které reflektovaly vlastnosti jednotlivých materiálů, byly tyto

rychlosti pouze ověřeny a zjištěna maximální rychlost, při které je ještě možné testovací objekt, v tomto případě kalibrační kočku, vytisknout bez zásadních deformací. Vzhledem k tomu, že tento objekt je menších rozměrů, nelze brát maximální rychlost při jaké byl vytištěn, jako limitní. V případě větších součástí může být možné tisknout i vyšší rychlostí, roste zde možnost rozměrové nepřesnosti, popřípadě možnost přeskočení kroku a z toho vyplývající deformace výtisku. V případě kalibrační kočky a maximálních rychlostí se jako hlavní limitací projevilo chlazení, které přestávalo dostáčet.

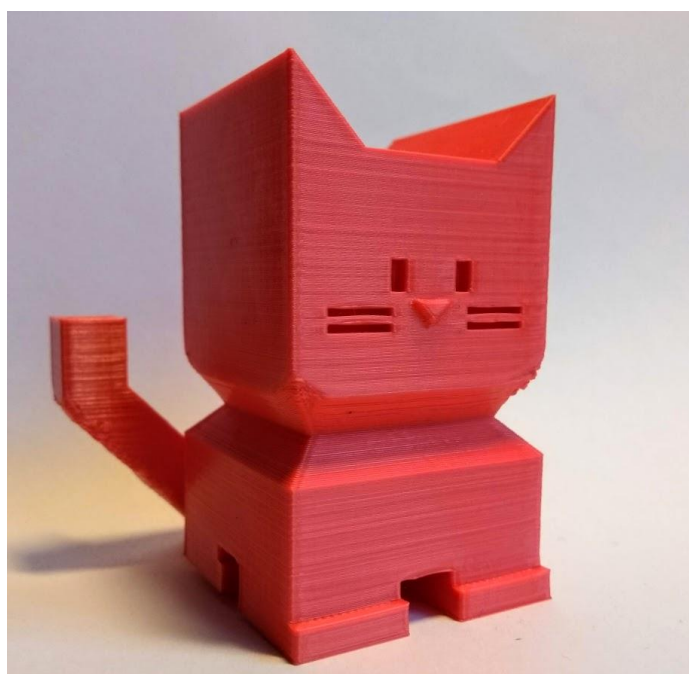


**Obr. 4-3 Test můstků**

Při retrakci je filament extrudérem vsunut zpět, aby bylo zabráněno nechtěnému vytlačení materiálu tryskou. Zejména v případě materiálu PET-G je potřeba retrakci vhodně nastavit, aby bylo zamezeno vzniku „stringingu“ neboli vzniku vlásků, v místech, kde stěna tisku končí a extrudér se přesunuje na jiné místo. V případě, že po vytištění testu z obrázku 4-4 se mezi trny objevují nitky materiálu, je třeba přidat vzdálenost či rychlost retrakce. Cílem je tyto nitky eliminovat.



**Obr. 4-4 Test retrakce**

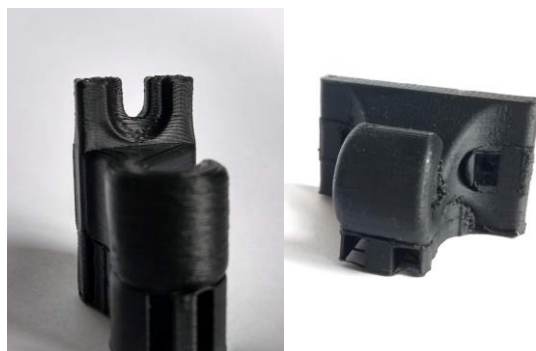


**Obr. 4-5 Kalibrační kočka**

### **4.3 Orientace modelu při tisku**

V případě tisku testovacích objektů je jejich orientace předem daná, v praxi je ale třeba brát v potaz vlastnosti materiálu, ze kterého má být objekt vytištěn, v ideálním případě už ve fázi návrhu objektu, kdy lze některé rozměry, nejčastěji otvory, upravit tak, aby byly vytištěny správně a nedocházelo k jejich nepřesnostem vlivem například smrštění. Příkladem je obrázek 4-6, kde jsou vytištěny ve dvou různých orientacích držáky stínítka Porsche 944 z materiálu ASA. Na levém objektu, který byl tištěn

„na výšku“ je zřetelné smrštění na horní části výtisku. U pravého objektu, který byl tištěn „na délku“ k tomuto zkreslení nedochází.



**Obr. 4-6 Vliv orientace tisku na deformace**

**Tab. 4-1 Zjištěné parametry tisku materiálů**

	ABS	ASA	PETG	PLA HD
Teplota extrudéru	250 °C	265 °C	235 °C	220 °C
Teplota tiskové podložky	105 °C	110 °C	75 °C	65 °C
Chlazení tisku	Ne	Ano	Ano	Ano
Maximální rychlosti tisku	60 mm/s	80 mm/s	100 mm/s	80 mm/s

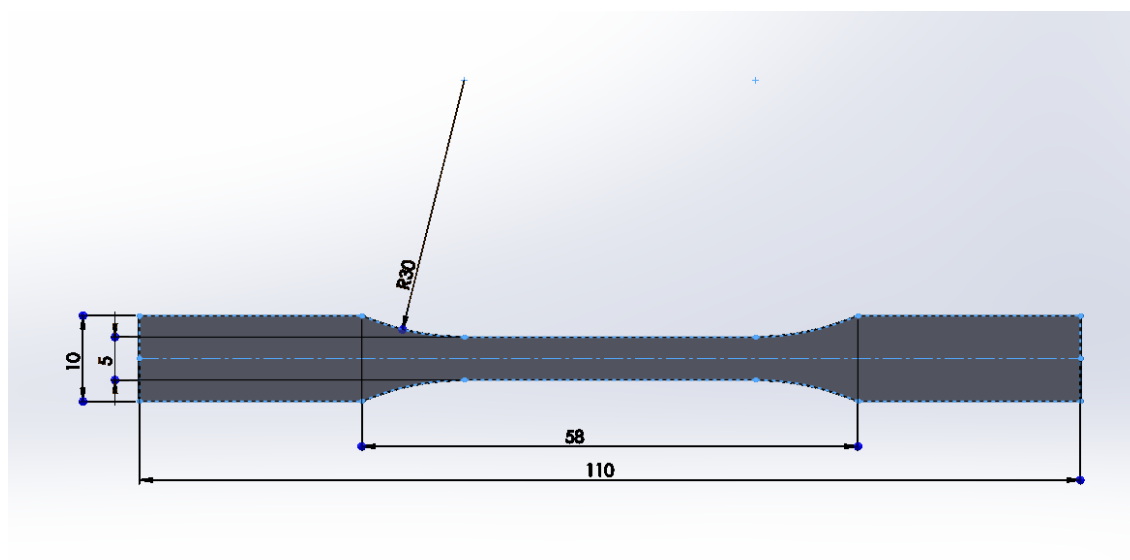
## 5. TESTOVÁNÍ MATERIÁLŮ

Následující kapitola popisuje přípravu vzorků, jejich testování a vyhodnocení výsledků. Vzhledem k tomu, že pro objekty vytvořené 3D tiskem neexistují normy k určení jejich mechanických vlastností, tak bylo postupováno dle norem ISO pro testování za tepla tvářených materiálů. Zjištěné parametry jsou shrnuty v tabulce 5-12, ve které jsou také porovnány s udanými hodnotami od výrobce a jsou zde zahrnuty i ceny materiálů.

### 5.1 Příprava vzorků

Při přípravě testů a vzorků bylo určeno, že každý materiál bude testován i v několika orientacích tisku. Pro každý test bylo také potřeba vybrat vhodné zkušební těleso. Parametry výplně tisku, její hustota, počet stěn byly zvoleny pro všechny vzorky stejné. Tyto parametry jsou shrnuty v tabulce 5-1.

Pro stanovení tahových vlastností bylo z normy ČSN EN ISO 527-2 vybráno zkušební těleso 1BA<sup>[16]</sup>. Toto zkušební těleso bylo vytištěno ve dvou provedeních. První o délce 110 mm pro zkoušku tahových vlastností, vytištěné největší plochou položenou na tiskovou podložku, a druhé o délce 80 mm vytištěno „na výšku“ pro vyhodnocení přilnavosti vrstev. Tyto orientace jsou zobrazeny na obrázku 5-3.

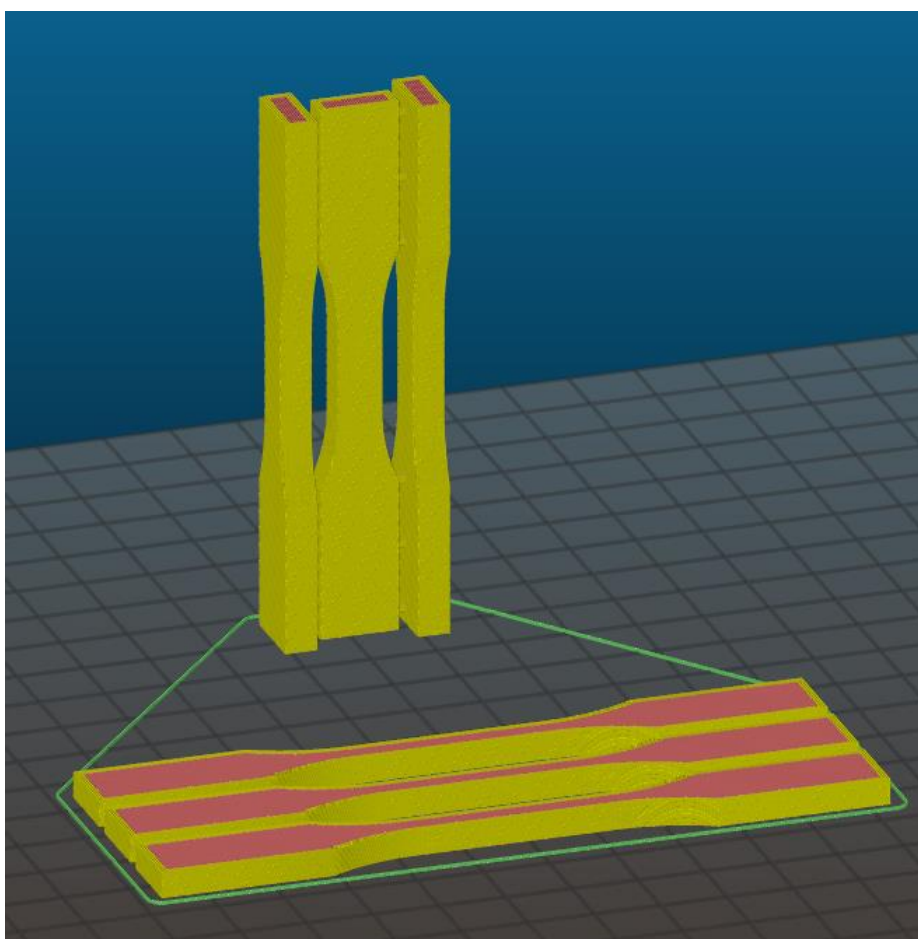


Obr. 5-1 Zkušební těleso dle ČSN EN ISO 527-2 1BA – návrh





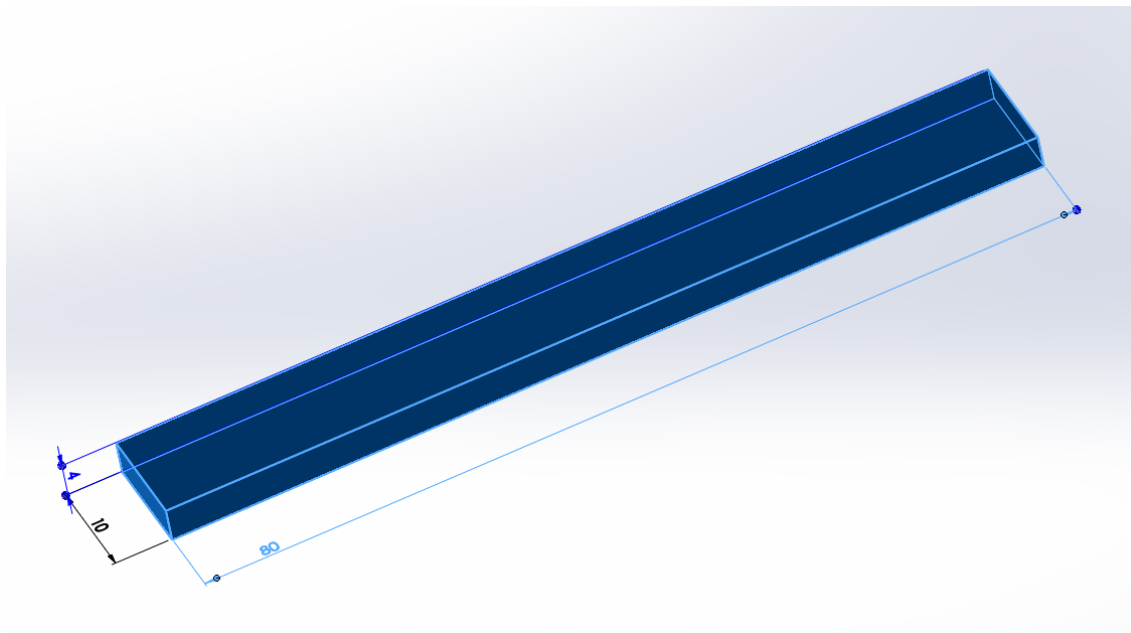
**Obr. 5-2 Zkušební těleso dle ČSN EN ISO 527-2 1BA**



**Obr. 5-3 Orientace tisku zkušebních těles pro zkoušku tahových vlastností**

Pro zkoušku rázové houževnatosti byl normou ČSN EN ISO 179 určen přednostní typ zkušebního objektu o délce 80 mm, šířce 10 mm a tloušťce 4 mm. <sup>[17]</sup> Toto zkušební těleso bylo vytištěno ve třech orientacích, ty jsou označeny směr 1, 2 a 3. Směr 1 je vytištěný „na plocho“, kdy je největší plocha 80 na 10 mm položena na tiskové podložce. Směr 2

je vytištěný obdobně, ale na tiskové podložce je položena druhá největší plocha 80 na 4 mm. Směr 3 je vytištěný „na výšku“ a slouží k vyhodnocení přilnavosti vrstev. Zkušební objekty pro tyto testy byly také využity při vyhodnocení rozměrové přesnosti.

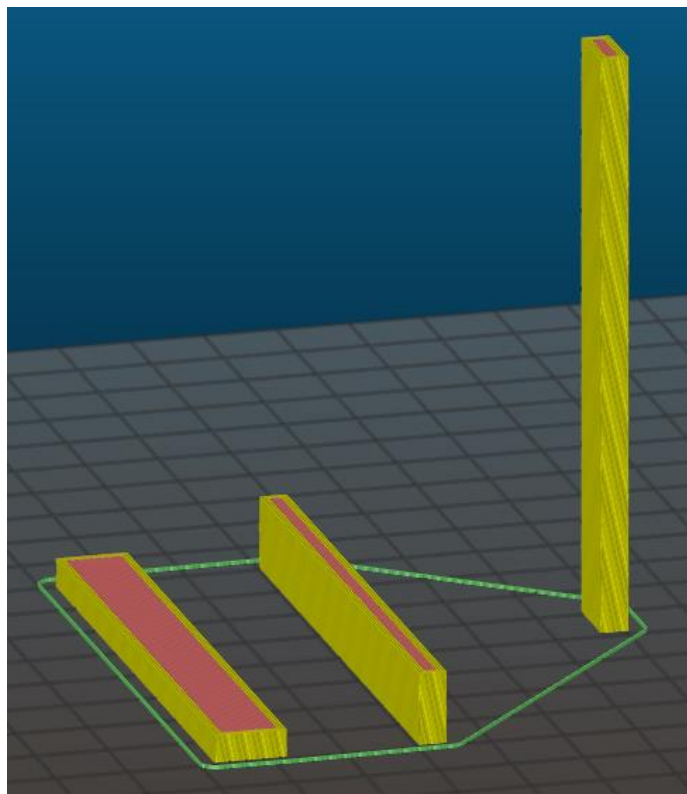


**Obr. 5-4 Přednostní zkušební těleso dle ČSN EN ISO 179 - návrh**



**Obr. 5-5 Přednostní zkušební těleso dle ČSN EN ISO 179**





**Obr. 5-6 Orientace tisku vzorků pro zkoušku rázové houževnatosti**

Za účelem zachování jednotlosti výsledků byly všechny vzorky vytištěny s jednotnou výplní. Vzhledem k tomu, že v praxi se při 3D tisku velmi zřídka používá větší procento výplně než 25 %, bylo vybráno právě 25 %. Jako druh výplně byla na základě praktických zkušeností vybrána výplň typu Honeycomb. Stejně tak i rychlost tisku byla u všech vzorků všech materiálů nastavena stejně, tedy na rychlost 50 mm/s při tisku perimetrů bez ohledu na orientaci tisku, ačkoli jak je možné vidět v tabulce 4-1, dosažené maximální rychlosti tisku byly značně vyšší.

Normy určují, že minimální počet vzorků v souboru je 5, pro každý materiál a orientaci tisku bylo tedy potřeba vytisknout alespoň pět kusů a dalších pět, které byly podrobeny teplotnímu namáhání. S ohledem na riziko nutnosti vyřazení některých vzorků po teplotním namáhání bylo od každého typu vzorku vytištěno alespoň 15 kusů.

**Tab. 5-1 Nastavení parametrů tisku vzorků**

Vrstvy a perimetry	
Výška vrstvy	0,2 mm
Počet perimetrů	3
Počet plných horních/spodních vrstev	4
Výplň	
Hustota výplně	25 %
Vzor výplně	Honeycomb
Vzor horních/spodních vrstev	Rectilinear
Rychlost tisku	
Perimetry	50 mm/s
Výplň	50 mm/s
Plná výplň	50 mm/s
Rychlost první vrstvy	35 mm/s

## 5.2 Rozměrová přesnost

Při tvorbě modelu a přípravě tisku je nutno brát také na zřetel přesnost tiskárny a vlastnosti materiálu, zejména jeho smrštění při tisku. Vzorky určené pro test nárazové houževnatosti vytištěné ve směrech 1 a 2 byly změřeny a vyhodnocena jejich přesnost vůči rozměrům modelu. Z výsledků v tabulce 5-2 a 5-3 lze usoudit, že rozměrově nejpresnější jsou vzorky natištěné z materiálu PET-G, které mají také nejmenší vnitřní pnutí při tisku. Jejich odchylka od stanoveného rozměru v ose X (délce) a Y (šířce) se pohybuje v rozmezí 0,1 mm až 0,3 mm. Vzhledem k tomu, že jejich vnitřní pnutí, a tedy smrštění, je velmi malé, dochází pouze k malému přírůstku v ose Z (výšce).

Naopak nejvíce se smršťování projevuje u materiálů ABS a PLA HD. V případě ABS se i přes použití modifikace s aditivou snižujícími smršlivost dalo očekávat, ovšem u materiálu PLA HD je to neočekávané chování. V nejdelším rozměru byly vzorky průměrně smrštěny o více než 1,2 milimetru. Stejně tak díky velkému smrštění v osách X a Y docházelo k největšímu přírůstku v ose Z, až o 0,21 mm. Kompletní tabulka měření je přiložena v příloze. Použité rovnice (5.1 a 5.2) a příklady výpočtu se nacházejí pod tabulkou 5-3.

**Tab. 5-2 Rozměrová přesnost vzorků natištěných ve směru 1**

Délka = 80 mm	Průměr. hodnota [mm]	Odchylka [mm]	Odchylka [%]
ABS	79,29	-0,71	-0,89
ASA	79,46	-0,54	-0,67
PET-G	79,7	-0,3	-0,38
PLA HD	78,74	-1,26	-1,58
Šířka = 10 mm			
ABS	9,54	-0,46	-4,59
ASA	9,8	-0,2	-2,02
PET-G	9,9	-0,1	-1,03
PLA HD	9,81	-0,19	-1,88
Výška = 4 mm			
ABS	4,12	0,12	2,88
ASA	4,06	0,06	1,53
PET-G	4,02	0,02	0,38
PLA HD	4,1	0,1	2,45

**Tab. 5-3 Rozměrová přesnost vzorků natištěných ve směru 2**

Délka = 80 mm	Průměr. hodnota [mm]	Odchylka [mm]	Odchylka [%]
ABS	79,37	-0,63	-0,79
ASA	79,73	-0,27	-0,34
PET-G	79,84	-0,16	-0,20
PLA HD	78,78	-1,22	-1,53
Šířka = 4 mm			
ABS	3,86	-0,14	-3,50
ASA	3,94	-0,06	-1,50
PET-G	3,98	-0,02	-0,50
PLA HD	3,94	-0,06	-1,50
Výška = 10 mm			
ABS	10,22	0,22	2,20
ASA	10,02	0,02	0,20
PET-G	10,04	0,04	0,40
PLA HD	10,21	0,21	2,10

$$\text{Průměrná hodnota} - \text{udaná délka} = \text{Odchylka} \quad (5.1)$$

$$\frac{\text{Odchylka}}{\text{Udaná délka}} * 100 = \text{Odchylka} [\%] \quad (5.2)$$

Příklad výpočtu pro tabulku 5-3 1. řádek, ABS, délka 80 mm:

$$79,37 \text{ mm} - 80 \text{ mm} = -0,63 \text{ mm}$$

$$\frac{-0,63}{80} * 100 = -0,79 \%$$

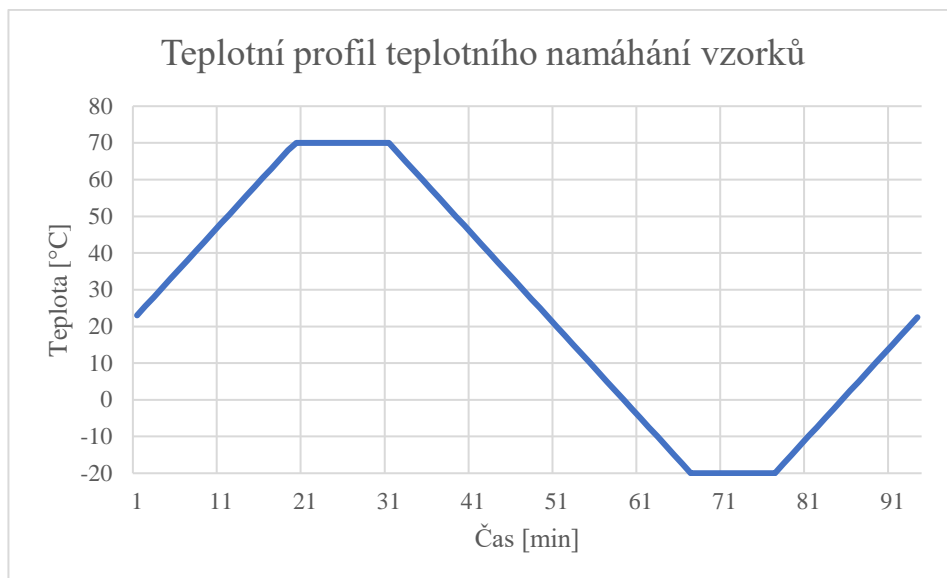
### 5.3 Teplotní cyklování a namáhání UV zářením

Část vzorků byla před mechanickými testy umístěna do teplotní komory. Použita byla klimatická komora Weiss-Vötsch C340, která je zobrazena na obrázku 5-3. Tato klimatická komora je schopna udržovat teploty v rozsahu -40 °C až 100 °C. Rychlost změny teploty je 2,5 K/min, rozsah udržovatelné vlhkosti vzduchu je 20-90 %.



**Obr. 5-7 Klimatická komora Weiss-Vötsch C340**

V klimatické komoře byly vzorky teplotně cyklovány v rozsahu teplot -20 °C až 70 °C za stálé vlhkosti 35 %. Cyklů ohřátí a ochlazení bylo sto. Poté bylo pohledem vyhodnoceno, jestli došlo k viditelné degradaci vzorků, poškozené vzorky byly vyřazeny a zbytek byl podroben mechanickým testům. K vyřazování vzorků došlo pouze u materiálu PET-G, kdy po teplotním cyklování došlo k průhybu zkušebního tělesa. Šlo o 4 ks z celkového počtu 15 ks.



**Graf č.1 Teplotní profil teplotního namáhání vzorků**

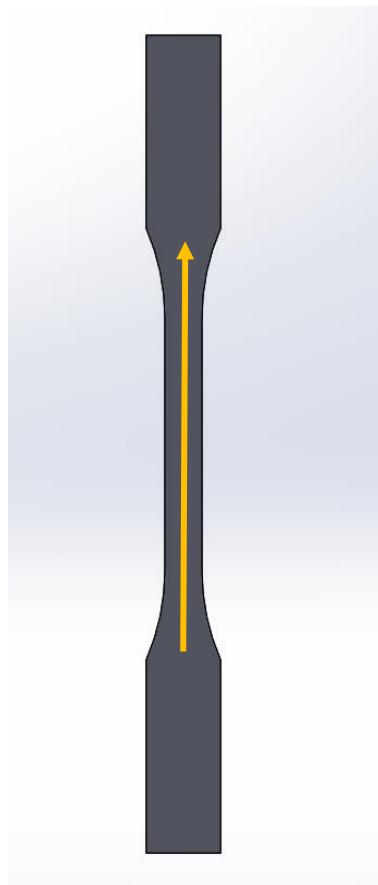
Další vzorky byly podrobeny namáhání UV zářením po dobu 100 hodin. U těchto vzorků byla vyhodnocena pouze degradace jejich povrchu. U všech materiálů ale nedošlo k žádné znatelné degradaci povrchu ani změně barvy. Důvodem je nejspíše dostatečná příliš krátká doba expozice. Na obrázku 5-8, kde je zobrazeno porovnání vzorku PLA HD před a po vystavení UV záření, ani není vidět jakákoli změna povrchu. Teoreticky by po delší době vystavení UV záření mělo docházet přinejmenším k zmatnění povrchu a vyblednutí barev u všech materiálů vyjma ASA.



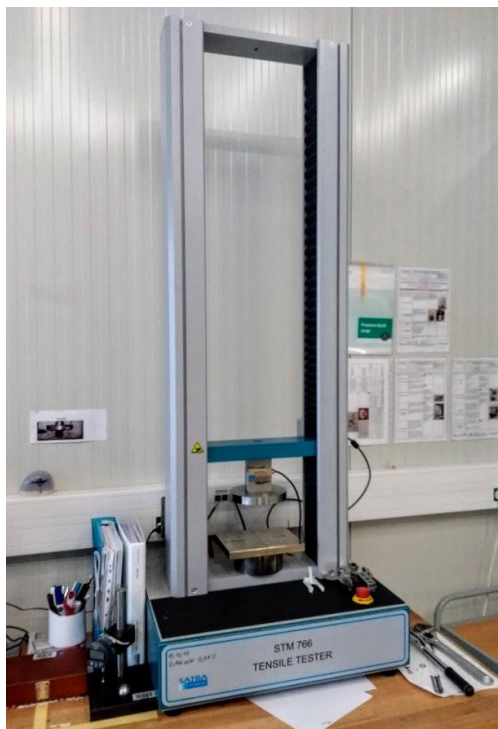
**Obr. 5-8 Porovnání vzorků před a po namáhání UV zářením**

## 5.4 Stanovení tahových vlastností

Zkouška stanovení tahových vlastností materiálu byla realizována v souladu s normou ČSN EN ISO 527-2. Při této zkoušce je zkušební těleso protahováno ve směru své hlavní podélné osy konstantní zkušební rychlostí do jeho porušení nebo do okamžiku kdy napětí nebo deformace dosáhnou předem zvolené hodnoty. Během této zkoušky je měřeno zatížení působící na zkušební těleso a jeho prodloužení. <sup>[18]</sup>



**Obr. 5-9 Směr tahu při zkoušce tahových vlastností**



**Obr. 5-10 Použitý tester – trhací lis STM 766**

K testu byl použit tester Satra STM 766, zkušební tělesa byla protahována až do jejich destrukce rychlostí 20 mm za minutu. Test byl proveden na dvou typech zkušebních objektů. Prvním typem byl objekt při tisku orientovaný tak, aby byla největší plocha položena na tiskové podložce, u těchto vzorků bylo vyhodnoceno napětí při přetržení. Druhým typem je objekt natištěný na výšku. U těchto vzorků byla vyhodnocena přilnavost vrstev a porovnána mezi materiály. Shrnutí naměřených a vypočtených hodnot je v tabulce 3-5 a 3-6. Vzhledem k tomu, že obslužný program nebyl schopný vyexportovat data o protažení vzorku, nebylo tedy možné vypočítat modul pružnosti materiálu.

**Tab. 5-4 Výsledky tahové zkoušky – pevnost v tahu**

ASA						
Vzorek	1	2	3	4	5	Prům.
Šířka [mm]	4,97	4,94	4,97	4,94	4,99	4,96
Tloušťka [mm]	4,09	4,12	4,12	4,10	4,13	4,11
Plocha [mm <sup>2</sup> ]	20,33	20,35	20,48	20,25	20,61	20,40
Napětí při přetržení [MPa]	36,95	37,36	37,05	37,51	36,73	37,12

ASA – Teplotně namáhané vzorky						
Vzorek	1	2	3	4	5	Prům.
Šířka [mm]	4,94	4,97	4,97	4,96	4,98	4,96
Tloušťka [mm]	4,08	4,10	4,08	4,12	4,13	4,10
Plocha [mm <sup>2</sup> ]	20,16	20,38	20,28	20,44	20,57	20,36
Napětí při přetržení [MPa]	35,74	34,97	36,20	35,04	35,16	35,42
ABS						
Vzorek	1	2	3	4	5	Prům.
Šířka [mm]	4,87	4,91	4,96	4,88	4,97	4,92
Tloušťka [mm]	4,05	4,04	4,05	4,05	4,06	4,05
Plocha [mm <sup>2</sup> ]	19,72	19,84	20,11	19,76	20,18	19,92
Napětí při přetržení [MPa]	37,31	37,04	36,33	37,17	36,30	36,83
ABS – Teplotně namáhané vzorky						
Vzorek	1	2	3	4	5	Prům.
Šířka [mm]	4,90	4,91	4,84	4,94	4,95	4,91
Tloušťka [mm]	4,05	4,05	4,05	4,07	4,05	4,05
Plocha [mm <sup>2</sup> ]	19,85	19,89	19,60	20,11	20,05	19,90
Napětí při přetržení [MPa]	34,67	34,71	35,26	34,19	34,58	34,68
PET-G						
Vzorek	1	2	3	4	5	Prům.
Šířka [mm]	4,95	5,00	4,97	5,02	4,99	4,99
Tloušťka [mm]	4,02	4,01	4,01	4,02	4,02	4,02
Plocha [mm <sup>2</sup> ]	19,90	20,05	19,93	20,18	20,06	20,02
Napětí při přetržení [MPa]	43,23	43,00	42,83	42,47	42,86	42,88
PET-G – teplotně namáhané vzorky						
Vzorek	1	2	3	4	5	Prům.
Šířka [mm]	4,98	5,00	4,99	4,98	5,01	4,99
Tloušťka [mm]	4,00	4,01	4,03	4,02	4,00	4,01
Plocha [mm <sup>2</sup> ]	19,92	20,05	20,11	20,02	20,04	20,03
Napětí při přetržení [MPa]	39,99	39,95	39,38	39,88	39,90	39,82
PLA HD						
Vzorek	1	2	3	4	5	Prům.
Šířka [mm]	4,93	4,98	4,94	4,99	4,90	4,95
Tloušťka [mm]	4,00	3,99	3,98	3,97	3,99	3,99
Plocha [mm <sup>2</sup> ]	19,72	19,87	19,66	19,81	19,55	19,72
Napětí při přetržení [MPa]	47,74	46,93	47,37	47,27	47,97	47,46
PLA HD – teplotně namáhané vzorky						
Vzorek	1	2	3	4	5	Prům.
Šířka [mm]	4,96	4,95	4,92	4,93	4,96	4,94
Tloušťka [mm]	4,01	3,97	3,99	3,97	4,01	3,99
Plocha [mm <sup>2</sup> ]	19,89	19,65	19,63	19,57	19,89	19,73
Napětí při přetržení [MPa]	45,96	46,89	46,77	46,52	45,80	46,39



Z naměřených hodnot lze určit, že materiály ABS a ASA jsou si velice podobné, přičemž napětí při přetržení u materiálu ASA je o 0,3 MPa větší. Teplotně namáhané vzorky také ztrácejí svou pevnost v tahu podobně. V případě ASA jsou teplotně namáhané vzorky slabší o 4,57 %, v případě ABS o 5,83 %. U materiálu ASA je naměřená hodnota o 7,88 MPa nižší než výrobcem udaná obvyklá hodnota pevnosti v tahu 45 MPa. Tento rozdíl je způsoben jinou metodikou měření a také použitím jiného testovacího tělesa.

PET-G je v tomto případě nejslabším materiálem, jeho průměrné napětí při přetržení je 42,88 MPa a u teplotně namáhaných vzorků je pokles tohoto napětí 7,23 % na hodnotu 39,82 MPa.

PLA HD je v tomto testu nejsilnějším materiálem, pro jeho přetržení je třeba napětí 47,46 MPa, respektive 46,39 MPa pro teplotně namáhané vzorky. Tyto hodnoty sice neodpovídají výrobcem udané hodnotě 51 MPa, nicméně tento rozdíl je stejně jako v případě materiálu ASA způsoben použitím odlišného testovacího objektu.

**Tab. 5-5 Výsledky tahové zkoušky – přilnavost vrstev**

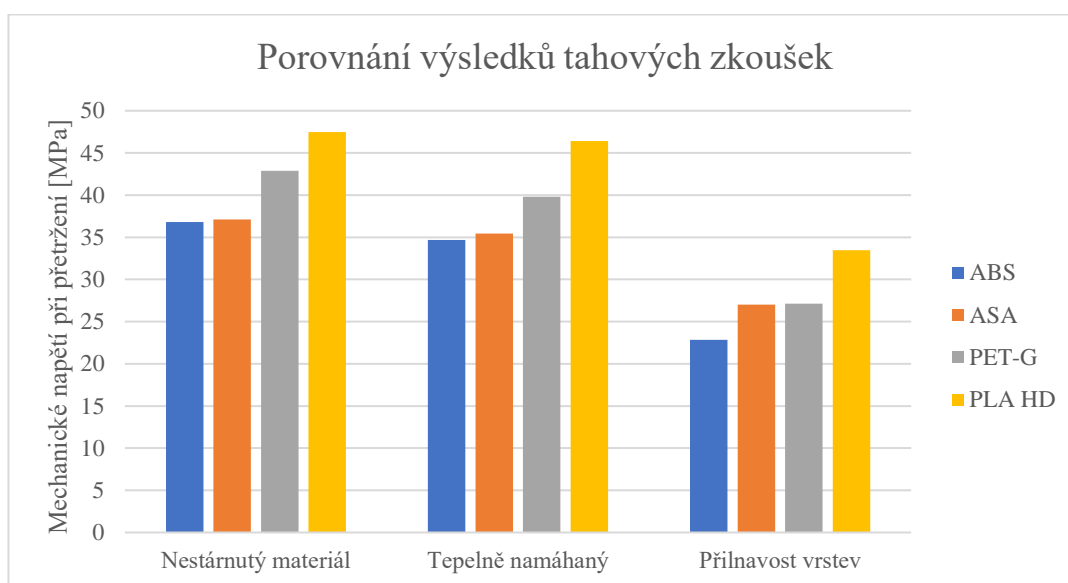
ASA						
Vzorek	1	2	3	4	5	Prům.
Šířka [mm]	6,73	6,76	6,75	6,74	6,74	6,74
Tloušťka [mm]	4,71	4,70	4,71	4,70	4,73	4,71
Plocha [mm <sup>2</sup> ]	31,70	31,77	31,79	31,68	31,88	31,76
Napětí při přetržení [MPa]	27,16	27,47	26,84	26,99	26,71	27,03
ABS						
Vzorek	1	2	3	4	5	Prům.
Šířka [mm]	6,67	6,86	6,82	6,80	6,84	6,80
Tloušťka [mm]	4,77	4,83	4,82	4,83	4,84	4,82
Plocha [mm <sup>2</sup> ]	31,82	33,13	32,87	32,84	33,11	32,75
Napětí při přetržení [MPa]	23,61	22,53	22,76	22,99	22,25	22,83
PET-G						
Vzorek	1	2	3	4	5	Prům.
Šířka [mm]	6,67	6,76	6,75	6,77	6,76	6,74
Tloušťka [mm]	4,87	4,90	4,88	4,88	4,87	4,88
Plocha [mm <sup>2</sup> ]	32,48	33,12	32,94	33,04	32,92	32,90
Napětí při přetržení [MPa]	27,51	26,57	27,35	26,87	27,25	27,11

PLA HD						
Vzorek	1	2	3	4	5	Prům.
Šířka [mm]	6,83	6,72	6,74	6,86	4,88	6,41
Tloušťka [mm]	4,81	4,80	4,82	4,88	4,87	4,84
Plocha [mm <sup>2</sup> ]	32,85	32,26	32,49	33,48	23,77	30,97
Napětí při přetržení [MPa]	34,61	33,68	33,85	32,31	32,94	33,48

Z naměřených výsledků je vidět, že k nejpevnějšímu spojení vrstev dochází u materiálu PLA HD. U materiálů typu PLA je obecně přilnavost vrstev velmi dobrá, zde je ještě posílena při vytvrzení materiálu. Nejslabší spojení vrstev je při této zkoušce u materiálu ABS, u materiálů ASA a PET-G jsou výsledky srovnatelné.

**Tab. 5-6 Porovnání výsledků tahových zkoušek**

Napětí při přetržení	ABS	ASA	PET-G	PLA HD
Nestárnutý materiál	36,82 MPa	37,12 MPa	42,88 MPa	47,46 MPa
Tepelně namáhaný	34,68 MPa	35,42 MPa	39,82 MPa	46,39 MPa
Přilnavost vrstev	22,83 MPa	27,03 MPa	27,11 MPa	33,48 MPa



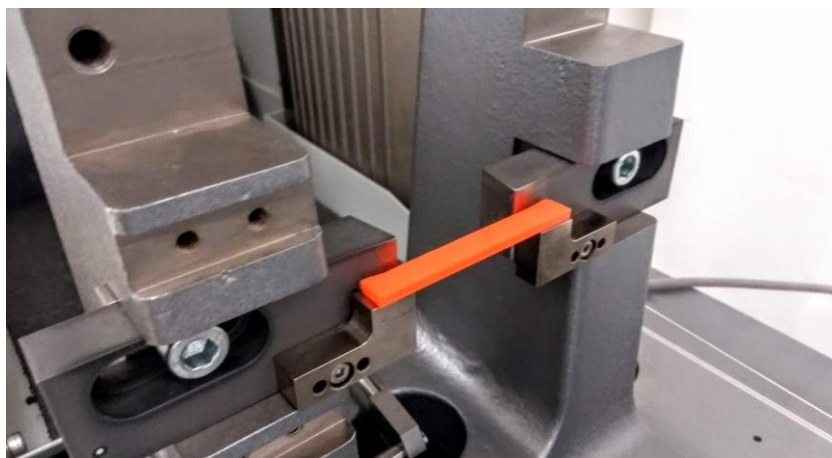
**Graf č. 2 Porovnání výsledků tahových zkoušek**

Tabulka 5-6 zobrazuje porovnání výsledků z jednotlivých tahových zkoušek. Je vidět, že materiálem, který je v tahu ve všech ohledech nejsilnější, je PLA HD, které ostatní zkoušené materiály převyšuje při všech zkouškách. Z toho lze usoudit, že pro aplikace, kde by byla součástka namáhána tahem, bude nejvhodnější právě PLA HD.

Překvapivě dobře zde dopadl i materiál PET-G, o kterém je ale obecně známo, že je dost pružný, ale jeho nevýhodou je nízká teplotní odolnost a jeho křehkost při nárazu.

## 5.5 Test rázové houževnatosti materiálu

Zkouška stanovení rázové houževnatosti byla realizována v souladu s normou ČSN EN ISO 179, konkrétně dle části dvě pro instrumentovanou rázovou zkoušku. Při této zkoušce je zkušební těleso umístěno vodorovně na podpěrách (zobrazeno na obrázku 5-6) a následně přeraženo úderem rázového kyvadla, přičemž směr rázu je veden středem vzdálenosti mezi podporami. Zkušební těleso je tedy ohýbáno vysokou a konstantní rychlostí. <sup>[19]</sup>



**Obr. 5-11 Umístění vzorku v testeru**

Použitým přístrojem byl tester Zwick Roell HIT50P, který je osazen 50 J kyvadlem. Úder byl proveden na užší stranu vzorku. Naměřená data pak byla zpracována obslužným programem a vyexportována do tabulky. Vzhledem k velkému počtu měření bylo třeba při provádění zkoušky potřeba naměřená data uložit do několika souborů. Kompletní data jsou umístěna v příloze.



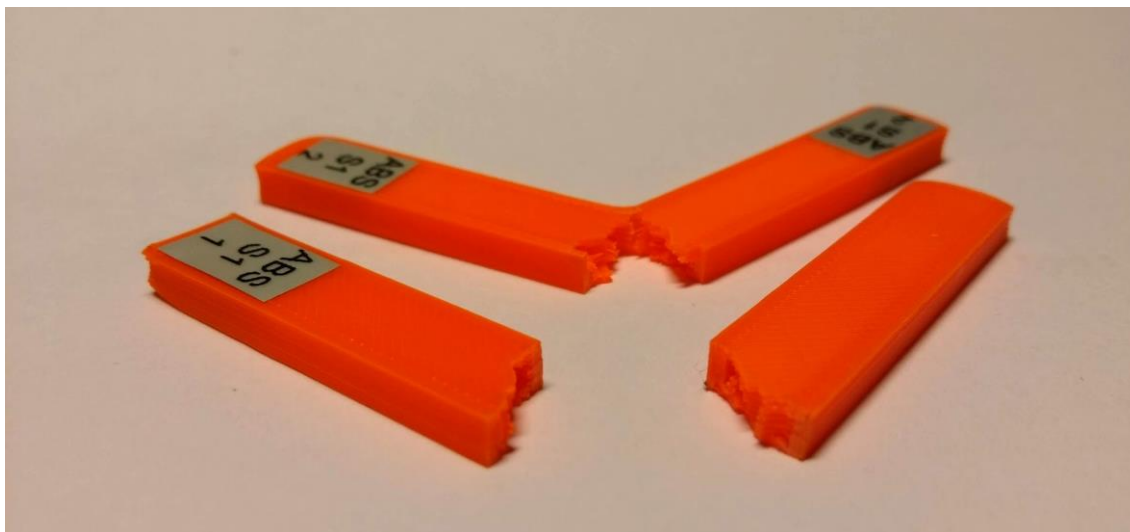
**Obr. 5-12 Tester Zwick Roell HIT50P**

**Tab. 5-7 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti ABS**

	ABS			ABS – Teplotně namáhané	
	Rázová houževnatost [kJ.m <sup>-2</sup> ]				
	Směr 1	Směr 2	Směr 3	Směr 1	Směr 2
Vzorek 1	19,06	16,36	12,72	16,26	17,83
Vzorek 2	16,02	20,26	10,65	12,43	16,47
Vzorek 3	16,65	20,39	11,33	14,17	20,42
Vzorek 4	-	21,68	9,49	16,57	16,19
Vzorek 5	-	20,94	11,47	17,17	15,44
Průměr	17,24	19,93	11,13	15,32	17,27

Z hodnot v tabulce 5-7 je vidět, že vzorky ve směru 2 mají vyšší houževnatost než v ostatních směrech. V případě vzorku 4 a 5 ve směru 1 došlo k chybě při provedení zkoušky a tyto výsledky byly vyřazeny.

U několika vzorků ABS nedošlo k úplnému přeražení, tyto vzorky zůstaly spojené jednou či dvěma stěnami, viz obrázek 5-10.



**Obr. 5-13 Přeražené vzorky ABS**

**Tab. 5-8 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti ASA**

	ASA			ASA – Teplotně namáhané	
	Rázová houževnatost [kJ.m <sup>-2</sup> ]				
	Směr 1	Směr 2	Směr 3	Směr 1	Směr 2
Vzorek 1	26,38	29,89	17,44	39,09	28,02
Vzorek 2	41,73	48,28	15,16	39,25	45,53
Vzorek 3	32,63	33,07	3,88	32,96	36,67
Vzorek 4	33,96	40,88	4,79	38,11	-
Vzorek 5	34,16	33,29	11,49	36,72	-
Průměr	33,77	35,61	10,55	37,23	36,74

Při testování materiálu ASA je ve výsledcích v tabulce 5-8 vidět poměrně velký rozptyl hodnot. Proč ale došlo k tomuto rozptylu? Je pravděpodobné, že velký rozdíl vznikl díky různému umístění vzorku v uchycení. V případě, že se hrana kladiva trefila do místa se slabší výplní, mohla být výsledná houževnatost podstatně nižší.

Také u materiálu ASA nedošlo vždy k úplnému přeražení vzorku. Lámání vzorků je zobrazeno na obrázku 5-11.



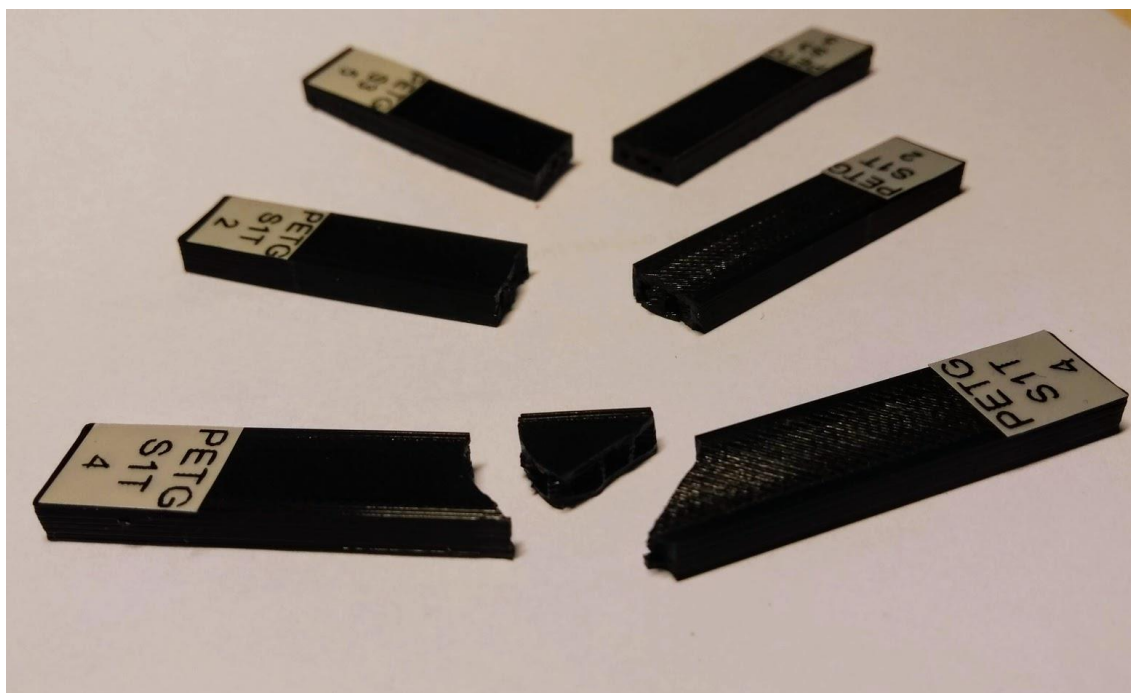
**Obr. 5-14 Přeražené vzorky ASA**

**Tab. 5-9 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti PET-G**

	PET-G			PET-G – Teplotně namáhané	
	Rázová houževnatost [kJ.m <sup>-2</sup> ]				
	Směr 1	Směr 2	Směr 3	Směr 1	Směr 2
Vzorek 1	16,82	14,03	3,55	29,49	79,67
Vzorek 2	11,93	13,16	4,4	23,53	58,96
Vzorek 3	23,46	14,38	3,78	11,33	13,75
Vzorek 4	17,18	12,92	5,13	25,72	14,62
Vzorek 5	16,78	11,35	1,79	10,47	17,63
Průměr	17,23	13,17	3,73	20,11	36,93

I v případě PET-G se ve výsledcích objevuje poměrně velký rozptyl hodnot. V případě teplotně namáhaných vzorků 1 a 2 ve směru 2 naměřená houževnatost několikrát přesahuje hodnoty ostatních vzorků. Pro další vyhodnocení v dalších tabulkách byly tyto dvě hodnoty vyřazeny.

Při přerážení vzorku docházelo často k tříštění vzorku na více než dva kusy. Tento jev je vidět na obrázku 5-12.

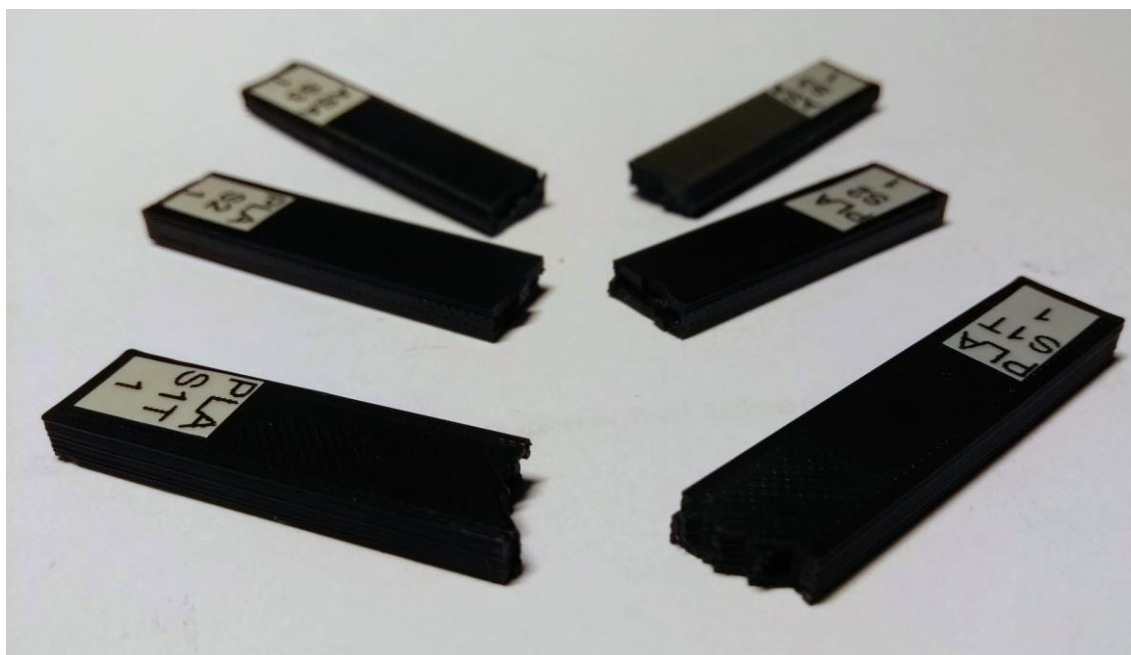


**Obr. 5-15 Přeražené vzorky PET-G**

**Tab. 5-10 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti PLA HD**

	PLA HD			PLA HD – Teplotně namáhané	
	Rázová houževnatost [kJ.m <sup>-2</sup> ]				
	Směr 1	Směr 2	Směr 3	Směr 1	Směr 2
Vzorek 1	14,61	13,5	11,55	15,56	14,23
Vzorek 2	11,88	14,15	16,69	14,08	14,37
Vzorek 3	18,13	14,08	-	12,84	13,59
Vzorek 4	17,6	15,79	-	15,16	15,07
Vzorek 5	14,5	15,15	-	13,73	14,74
Průměr	15,34	14,53	9,41	14,27	14,4

V případě zkoušky materiálu PLA HD jsou naměřené hodnoty poměrně konzistentní, výjimkou jsou měření ve směru 3, kdy došlo u tří vzorků k přeražení s téměř nulovou silou. Tyto hodnoty byly z vyhodnocování vyřazeny. U tohoto materiálu došlo vždy k úplnému přeražení vzorku.

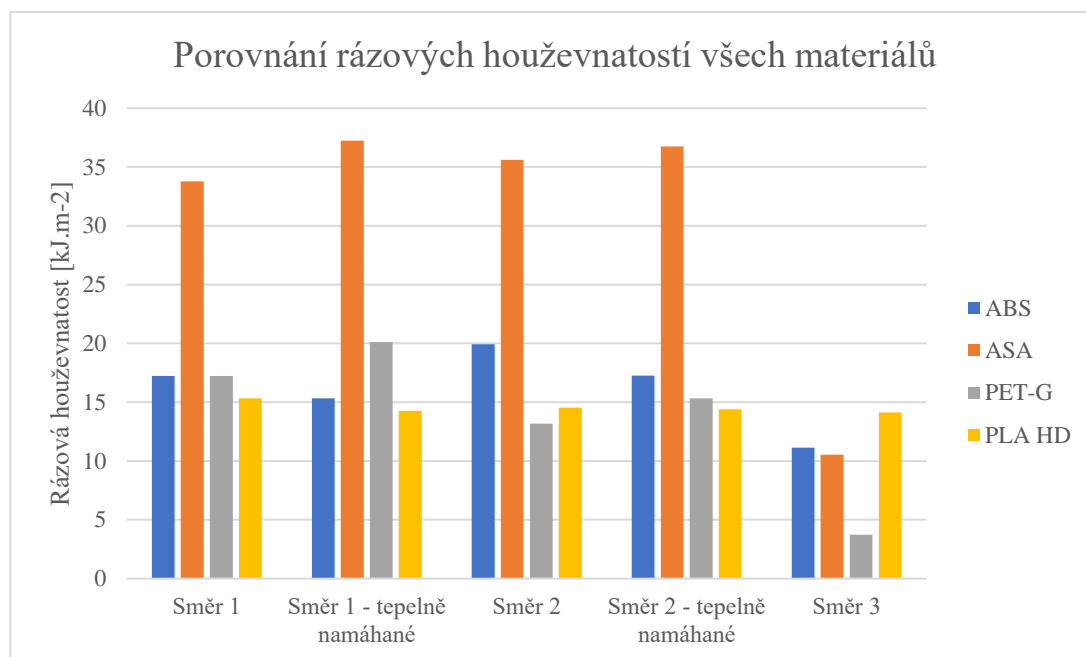


**Obr. 5-16 Přeražené vzorky PLA HD**

**Tab. 5-11 Porovnání výsledků všech materiálů**

Rázová houževnatost	ABS	ASA	PET-G	PLA HD
Směr 1	17,24 kJ.m <sup>-2</sup>	33,77 kJ.m <sup>-2</sup>	17,23 kJ.m <sup>-2</sup>	15,34 kJ.m <sup>-2</sup>
Směr 1 - tepelně namáhané	15,32 kJ.m <sup>-2</sup>	37,23 kJ.m <sup>-2</sup>	20,11 kJ.m <sup>-2</sup>	14,27 kJ.m <sup>-2</sup>
Směr 2	19,93 kJ.m <sup>-2</sup>	35,61 kJ.m <sup>-2</sup>	13,17 kJ.m <sup>-2</sup>	14,53 kJ.m <sup>-2</sup>
Směr 2 - tepelně namáhané	17,27 kJ.m <sup>-2</sup>	36,74 kJ.m <sup>-2</sup>	15,33 kJ.m <sup>-2</sup>	14,40 kJ.m <sup>-2</sup>
Směr 3	11,13 kJ.m <sup>-2</sup>	10,55 kJ.m <sup>-2</sup>	3,73 kJ.m <sup>-2</sup>	14,12 kJ.m <sup>-2</sup>





**Graf č. 3 Porovnání rázových houževnatostí všech materiálů**

Z porovnání výsledků zkoušek vidíme, že nejhouževnatějším materiálem je ASA. Zvláštním úkazem je, že tepelně namáhané vzorky tohoto materiálu mají rázovou houževnatost mírně vyšší. Tento jev se ale objevuje i u PET-G. Vzhledem k tomu, že testovací vzorky nejsou homogenní, ale jejich výplň má určitou hustotu a vzor, tak toto zkreslení vzniklo v případě, že došlo k posunu vzorku a nárazu do místa s menším či větším množstvím výplně. V případě použití hustější, či jiné výplně by toto zkreslení mohlo být menší. Pro účely testu a porovnání materiálů jsou ale tyto výsledky dostačující. Zároveň je vidět, že vliv teplotního namáhání na houževnatost materiálu nemá v případě materiálů ASA a PLA HD vliv pouze minimální. U materiálu PLA HD jsou dokonce výsledky ve všech směrech tisku velmi podobné.

## 5.6 Vyhodnocení výsledků

Cílem práce je provést testy vybraných materiálů, tyto materiály porovnat a nalézt nejvhodnější materiál z hlediska odolnosti, náročnosti tisku a zároveň také ceny. Srovnání udaných, naměřených a dalších údajů je níže v tabulce 5-12.

**Tab. 5-12 Porovnání cen a vlastností materiálů**

Informace o materiálu					
Materiál		ABS-T	ASA	PET-G	PLA HD
Výrobce		Plasty Mladeč	Fillamentum	Plasty Mladeč	Fiberlogy
Cena		605 Kč/1 kg	670 Kč /0,75 kg	605 Kč/1 kg	830 Kč /0,85 kg
Teploty tisku					
Extrudér	Udaná [°C]	230-250	240-255	230-250	200-220
	Určená [°C]	250	265	235	220
Tisková podložka	Udaná [°C]	110	90-105	60-80	50-70
	Určená [°C]	105	110	75	65
Mechanické vlastnosti					
Pevnost v tahu při přetržení	Udaná [MPa]	-	45	-	51
	Změřená [MPa]	36,82	37,12	42,88	47,46
Rázová houževnatost	Udaná [kJ.m <sup>-2</sup> ]	20	-	11	20
	Změřená (Směr 1) [kJ.m <sup>-2</sup> ]	17,24	33,77	17,23	15,34
	Změřená (Směr 2) [kJ.m <sup>-2</sup> ]	19,93	35,61	13,17	14,53
Teplotní odolnost					
HDT [°C]		97	86	70	144

Dle informací v tabulce výše ale nelze vybrat ideální materiál. V potaz je potřeba také brát další specifika jednotlivých materiálů a také praktické zkušenosti s jednotlivými materiály. Proto jsou jednotlivé materiály zhodnoceny v samostatných podkapitolách, kde je také popsáno jejich možné použití pro součástky.

### 5.6.1 ABS

Vzhledem k tomu, že ABS má v automobilovém průmyslu široké použití, je bez problému možné jej používat pro tisk různých interiérových součástek, záslepek a podobně.

Co se tiskových vlastností týká, nejlepších výsledků bylo dosaženo při teplotách 250 °C extrudéru a 105 °C tiskové podložky. ABS je známo špatnou přilnavostí k tiskovým podložkám, ale s podložkou Ultrabase se tyto problémy objevovaly pouze u drobných součástek. Ke zlepšení adheze pak dobře posloužil tzv. ABS juice, neboli ABS rozpuštěné v acetonu.

Porovnáme-li mechanické vlastnosti s ostatními materiály, je ABS ve všech ohledech některým z materiálů překonáno a pro účely práce slouží zejména jako reference, podle které jsou hodnoceny ostatní materiály.

### **5.6.2 ASA**

Stejně jako ABS, je ASA v automobilovém průmyslu hojně využívána. Při testech se ukázalo, že jde o materiál s největší rázovou houževnatostí, při tisku nedochází k tak velkému smršťování jako u ABS a PLA HD. Navíc na rozdíl od těchto dvou materiálů by měla být mnohem více odolná UV záření. V tomto ohledu je tedy rozhodně vhodnější pro použití veškerých součástek, které vejdou do styku se slunečním světlem, tedy pro krytky a záslepky a veškeré interiérové součástky.

### **5.6.3 PET-G**

Dalo by se říci, že PET-G pro porovnání s ostatními materiály nemělo dobrou pozici. Už udané hodnoty rázové houževnatosti a teploty skelného přechodu jsou podstatně nižší než u ostatních.

V testech ale obstálo lépe, než bylo očekáváno. Pevnost v tahu je vyšší než u materiálů ABS a ASA, naměřená rázová houževnatost je vyšší než udaná hodnota. Při teplotním cyklování na hraně teploty skelného přechodu pak došlo k deformacím pouze několika kusů součástek. Reálné vlastnosti tohoto materiálu jsou tedy lepší, než by se z technického listu mohlo zdát.

Hlavní výhodou tohoto materiálu je velmi nízká smrštitivost. Další velice dobrou vlastností je výtečná chemická odolnost, ale tato vlastnost je v případě aplikace výroby plastových součástí automobilu poněkud těžko využitelná.

Jako materiál pro interiérové součástky je PET-G rozhodně použitelné, v praxi je ale nejlépe použitelné v průhledných variantách pro různé kryty osvětlení a podobné.

### **5.6.4 PLA HD**

Výrobce tohoto filamentu, společnost Fiberlogy, ve svých propagačních materiálech uvádí, že PLA HD má po vytvrzení podobné mechanické vlastnosti jako ABS. V praxi to

ovšem není pravda. ABS převyšuje pouze v pevnosti v tahu a tepelné odolnosti. Další vlastností, kde převyšuje ABS je pak smršťivost, která je vyšší.

V praxi navíc není PLA HD tak odolné vůči UV záření, takže není úplně vhodné pro venkovní a interiérové součástky. Ideální je ovšem pro použití v motorovém prostoru, například pro držáky větráku na chladiči automobilu, kde díky své teplotní odolnosti bez problému vydrží.

## 6. ZÁVĚR

Tato práce se zabývala testováním materiálu pro 3D tisk za účelem nalezení optimálního materiálu pro výrobu součástek do automobilů. V úvodu práce byl popsán 3D tisk, jeho stručná historie, použití v automobilovém průmyslu a popis technologie FDM. Dále byla popsána 3D tiskárna použita pro tisk vzorků, její parametry a modifikace.

Následně byly popsány vybrané materiály, jejich teoretické vlastnosti a shrnuty výrobci udané parametry. Byly nalezeny ideální tiskové parametry pro každý materiál, prozkoumána smrštivost jednotlivých materiálů, možné rychlosti tisku, vliv orientace modelu při tisku a určena metoda tvorby vzorků pro mechanické testy.

Před mechanickými testy byly vzorky namáhány teplotním cyklováním, konkrétně 100 cyklů ochlazení na  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a zahřátí na  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Další vzorky byly testovány UV zářením, ale doba expozice byla příliš krátká na to, aby se na vzorcích projevila degradace. Tepelně namáhané vzorky byly posléze testovány podle norem ČSN EN ISO 527, stanovení tahových vlastností, a ČSN EN IS 179, stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy. Souhrn těchto testů byl uveden do tabulky 5-12.

Ačkoli bylo cílem najít optimální materiál, po testování a v kombinaci s praktickými zkušenostmi, se ukázalo, že je lepší použít různé materiály pro různé aplikace. Materiál PLA HD je vhodný zejména pro součástky v motorovém prostoru, které nejsou exponovány. Materiál ASA, popřípadě ABS je pak vhodný pro většinu krytů a plastových součástí v exteriéru a interiéru. Materiál PET-G je vhodný spíše ve variantě průhledného materiálu pro krytky osvětlení a další nijak nenamáhané součástky.

Závěrem lze říci, že ačkoli neexistují normy pro testování plastových součástí vytvořených pomocí 3D tisku, normy určené pro tvářené plasty lze brát jako použitelné a ekvivalentní. Co se provedených testů týká, byl by vhodný další výzkum, který by se více zabýval degradací vlivem UV záření a odolností konkrétních součástek při mechanickém opotřebování.

# Literatura

- [1] Hull, C.: Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography [online] [cit. 2018-12-01] Dostupné na URL: <https://patents.google.com/patent/US4575330>
- [2] Prusa i3. *RepRap.org* [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: [https://reprap.org/wiki/Prusa\\_i3](https://reprap.org/wiki/Prusa_i3)
- [3] Clare, Scott: BMW Surpasses One Million 3D Printed Automotive Components [online] [cit. 2019-05-20]. Dostupné na URL: <https://3dprint.com/230237/bmw-surpasses-one-million-3d-printed-automotive-components/>
- [4] Future meets Classic: Next generation of genuine Mercedes-Benz replacement parts from 3D printer [online-pdf] [cit. 2019-05-20]. Dostupné na URL: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/print/Future-meets-Classic-Next-generation-of-genuine-Mercedes-Benz-replacement-parts-from-the-3D-printer.xhtml?oid=41898918>
- [5] Vyroubal, P.: 3D Tisk – přednáška z předmětu MTPL [PDF] [cit. 2018-11-20] Dostupné na URL: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=166327](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=166327)
- [6] Locker, A.: Anycubic 4Max (Formax) 3D Printer: Review the Facts [online] [cit. 2018-12-10] Dostupné na URL: <https://all3dp.com/1/anycubic-4max-formax-3d-printer-review/>
- [7] Coat: Strain relief heated bed-cable Anycubic 4MAX [online] [cit. 2019-05-20] Dostupné na URL: <https://www.thingiverse.com/thing:3319934>
- [8] Coat: cableclip/strain relief X-motor 4MAX [online] [cit. 2019-05-20] Dostupné na URL: <https://www.thingiverse.com/thing:3308559>
- [9] Technical data sheet for product: ABS-T Filament. [PDF] [cit. 2018-12-11] Dostupné na URL: <https://www.filament-pm.cz/stranka/technicke-listy-produktu-15>
- [10] Material safety data sheet HD PLA [PDF]. [cit. 2019-04-11]. Dostupné na URL: <https://fiberlogy.com/wp-content/uploads/2017/03/MSDS-HD-PLA.pdf>
- [11] Technical data sheet for product: PETG Filament. [PDF] [cit. 2019-04-11] Dostupné na URL: <https://www.filament-pm.cz/stranka/technicke-listy-produktu-15>
- [12] Datasheet ASA Extrafill [PDF] [cit. 2019-05-20] Dostupné na URL: [https://www.dropbox.com/sh/v7pxxt4kp4bbq0d/AADrGfc1GW3ogm8LrD1xB\\_DJa?dl=0&preview=Technical+Data+Sheet\\_ASA+Extrafill\\_03012019.pdf](https://www.dropbox.com/sh/v7pxxt4kp4bbq0d/AADrGfc1GW3ogm8LrD1xB_DJa?dl=0&preview=Technical+Data+Sheet_ASA+Extrafill_03012019.pdf)
- [13] CreativeTools: #3DBenchy – The jolly 3D printing torture-test by CreativeTools.se [online] [cit. 2019-04-11] Dostupné na URL: <https://www.thingiverse.com/thing:763622>
- [14] Downmace: Ender 3 PLA temp tower easy [online]. [cit. 2019-04-11]. Dostupné na URL: <https://www.thingiverse.com/thing:3329956>

- [15] Design: Cali Cat – the Calibration Cat [online][cit. 2018-12-12] Dostupné na URL: <https://www.thingiverse.com/thing:1545913>
- [16] ČSN EN ISO 527-2. Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 16 s. Třídící znak 64 0604.
- [17] ČSN EN ISO 179-1. Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 24 s. Třídící znak 64 0612.
- [18] ČSN EN ISO 527-1. Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 28 s. Třídící znak 64 0604.
- [19] ČSN EN ISO 179-2. Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000, 20 s. Třídící znak 64 0612.
- [20] KWON, Ohhun et al. Characterization and Control of Nanoparticle Emission during 3D Printing. Environmental science & technology [online] Dostupné na URL: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.7b01454>

## Seznam příloh

Příloha 1 - Technický list ABS-T .....	65
Příloha 2 - Technický list PLA HD .....	66
Příloha 3 - Technický list PET-G .....	67
Příloha 4 - Technický list ASA.....	68
Příloha 5 - Tabulky naměřených hodnot.....	69

..



# Příloha 1 - Technický list ABS-T



## TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:

### ABS-T FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	Acrylonitrilbutadienstyrene MMA, petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web <a href="https://www.filament-pm.com/abs-t">https://www.filament-pm.com/abs-t</a>		
Solvents	Acetone		
Printing Properties:			
Temperature HE	230 – 250 °C		
Temperature HB	110 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	NO		
Nozzle	All diameters / for glitter using nozzle min 0,5 mm and more		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	100 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	97 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	20 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	2000 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,08 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	2 g/10 min

## Příloha 2 - Technický list PLA HD



### TECHNICAL DATA SHEET HD PLA

**BRAND:** Fiberlogy  
**NAME:** Fiberlogy HD PLA Filament  
**MANUFACTURER:** Fiberlab S.A., Brzezcie 387, 32-014 Brzezcie, Poland  
**DESCRIPTION:** HD PLA filament designed for printing in FFF/FDM technology, available in different colors, wound on a spool, vacuum-packed in plastic, placed in a cardboard box.

#### TECHNICAL INFORMATION:

**Diameter Tolerance:** +/- 0,02 mm  
**Avg. Roundness:** + 0,01 mm  
**Print Temperature:** 200°C - 220°C  
**Bed Temperature:** 50°C - 70°C (Heating is not required when using the plates that increase adhesion), for printing on glass it's recommended to use additives for improving adhesion.  
**Density:** 1,24 g/cm<sup>3</sup>

Mechanical Properties	Test Method	Unit	Typical Value (before annealing)	Typical Value (after annealing)
Tensile modulus	ISO 527	MPa	3650	3710
Tensile strength at break	ISO 527	MPa	45	51
Flexural strength	ISO 178	MPa	90	93
Flexural modulus	ISO 178	MPa	3430	3435
Tensile elongation	ISO 527	%	2.7	2.4
Density	ISO 1183	g/cc	1.24	1.25
Impact strength	ISO 179-1	kJ/m <sup>2</sup>	11	20
HDT	ISO 75	°C	80	144

The information set forth herein has been gathered from test data of printed materials. To the best knowledge and belief of Fiberlab S.A. they are accurate and reliable. Information is offered only for your consideration, investigation and verification. Fiberlab S.A. makes no warranties, expressed or implied, with respect to the use of such information or the use of the specific material identified herein combination with any other material or process, and assumes no responsibility therefore.

Last update: 12/07/2017

## Příloha 3 - Technický list PET-G



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:

### PETG FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	Polyetylenetefthalat - polyester, petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
	2,0 kg netto ± 5% / 2,4 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web <a href="https://www.filament-pm.com/petg">https://www.filament-pm.com/petg</a>		
Solvents	Acetaldehyde, benzene		
Printing Properties:			
Temperature HE	230 – 250 °C		
Temperature HB	60 - 80 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	YES		
Nozzle	All diameters		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	85 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	70 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	11 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	1880 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,27 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	11 g/10 min

Filament-PM by Plasty Mladec, Hanovice 18, 78321, VAT: CZ00147346  
 Tel. +420 585 100 308, email: [info@plastymladec.cz](mailto:info@plastymladec.cz) <http://www.filament-pm.com>

# Příloha 4 - Technický list ASA

## Datasheet



## ASA Extrafill

### Description:

Thanks to mechanical properties is ASA filament ideal for the production of the first samples before serial production for functional prototyping, manufacturing tools, but also for the production of goods for everyday usage including outdoor applications.

The advantage of this material is its excellent weather resistance, high retention of physical features and low level of yellowing.

ASA has a higher rigidity than ABS and thus it is suitable for demanding applications. Another advantage is its good dimensional stability.

This material can be used for production of electrical and electronic equipment. It doesn't contain the restricted substances. The use of the material in the food or medical industry is not recommended.

Fillamentum guarantees precision of filament dimensions within the tolerance of  $\pm 0.05$  mm, which is strictly controlled throughout the production.



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,07 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792	
Melt flow index	5 g/10 min		220 °C, 10 kg
Diameter tolerance	$\pm 0.05$ mm		
Weight	750 g of filament ( $\pm 250$ g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	40 MPa	ASTM D638	50 mm/min
Elongation at break	85 %	ASTM D638	50 mm/min
Tensile modulus	1726 MPa	ASTM D638	1 mm/min
Flexural strength	62 MPa	ASTM D790	at yield, 15 mm/min
Flexural modulus	1814 MPa	ASTM D790	15 mm/min
Izod impact strength	441 J/m	ASTM D256	23 °C, 1/8"
Rockwell hardness	92	ASTM D783	R-Scale

Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Heat distortion temperature	86 °C	ASTM D648	1,8 MPa
	96 °C	ASTM D648	0,45 MPa
Vicat softening temperature	94 °C	ASTM D1525	50 °C/h, 5 kg

Printing properties	Recommended	Notes
Print temperature	240-255 °C	Recommended settings! It may differ according to the printer and the object.
Hot bed	90-105 °C	Try your own settings before printing.
Bed adhesive	30sec, glue stick	

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.

The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o.  
nam. Miru 1217, 768 24 Hulín  
Czech Republic

(+420) 720 060 947  
helpdesk@fillamentum.com  
www.fillamentum.com

## **Příloha 5 - Tabulky naměřených hodnot**

Nr	Označení série	Datum/Čas	Teoretická nárazová rychlost m/s	Celková hmotnost kg	Jmenovitá energie J	Fmax N	Sm mm	Wm J	Wlo konec J	W(%) %	W(Tfent) J	ak kJ/m <sup>2</sup>	ak-C kJ/m <sup>2</sup>	Typ porušení
01.IV	ABS - 01-1	08.05.2019 9:14	3,807	5,899	2,76	5,54	0,76	0,71	1,4	0,07	19,06	19,06	b	
01.V	ABS - 01-2	08.05.2019 9:15	3,807	6,899	3,04	0,5	0,64	0,68	1,4	0,07	16,02	16,02	b	
01.VI	ABS - 02-1	08.05.2019 9:17	3,807	6,899	3,02	0,51	0,67	0,65	1,3	0,07	16,65	16,65	b	
01.VII	ABS - 02-2	08.05.2019 9:20	3,807	6,899	3,04	0,59	0,65	0,66	1,3	0,07	16,36	16,36	b	
01.VIII	ABS - 02-3	08.05.2019 9:21	3,807	6,899	2,63	0,59	0,63	0,56	1,1	0,07	15,67	15,67	b	
01.IX	ABS - 02-4	08.05.2019 9:22	3,807	6,899	3,16	0,81	0,76	0,76	1,5	0,07	20,26	20,26	b	
01.X	ABS - 02-5	08.05.2019 9:23	3,807	6,899	2,94	0,68	0,82	0,83	1,7	0,07	20,39	-	P	
01.XI	ABS - 03-1	08.05.2019 9:24	3,807	6,899	3,06	0,57	0,87	0,88	1,8	0,07	21,68	-	N	
01.XII	ABS - 03-2	08.05.2019 9:26	3,807	6,899	3,12	0,76	0,84	0,81	1,6	0,07	20,94	20,94	b	
01.III	ABS - 03-3	08.05.2019 9:27	3,807	6,899	2,87	0,39	0,51	0,47	0,9	0,07	12,72	12,72	b	
01.IV	ABS - 03-4	08.05.2019 9:28	3,807	6,899	3,34	0,41	0,43	0,37	0,7	0,07	10,65	10,65	b	
01.V	ABS - 03-5	08.05.2019 9:29	3,807	6,899	2,28	0,42	0,45	0,39	0,8	0,07	11,33	11,33	b	
01.VI	ABS - 03-6	08.05.2019 9:30	3,807	6,899	2,09	0,34	0,38	0,35	0,7	0,07	9,49	9,49	b	
01.VII	ABS - 03-7	08.05.2019 9:31	3,807	6,899	3,43	0,41	0,46	0,39	0,8	0,07	11,47	11,47	b	
01.VIII	ABS - 03-8	08.05.2019 9:32	3,807	6,899	3,17	0,56	0,65	0,63	1,3	0,07	16,26	16,26	b	
01.IX	ABS - 03-9	08.05.2019 9:33	3,807	6,899	3,63	0,46	0,5	0,61	1,2	0,07	12,43	12,43	b	
01.X	ABS - 03-10	08.05.2019 9:34	3,807	6,899	3,28	0,51	0,57	0,63	1,3	0,07	14,17	14,17	b	
01.XI	ABS - 03-11	08.05.2019 9:35	3,807	6,899	3,63	0,61	0,66	0,66	1,3	0,07	16,57	16,57	b	
01.XII	ABS - 03-12	08.05.2019 9:36	3,807	6,899	3,3	0,59	0,69	0,66	1,3	0,07	17,17	17,17	b	
01.III	ABS - 03-13	08.05.2019 9:37	3,807	6,899	3,63	0,71	0,73	0,73	1,5	0,07	17,83	17,83	b	
01.IV	ABS - 03-14	08.05.2019 9:38	3,807	6,899	2,42	0,52	0,66	0,59	1,2	0,07	16,47	16,47	b	
01.V	ABS - 03-15	08.05.2019 9:39	3,807	6,899	3,94	0,75	0,82	0,81	1,6	0,07	20,42	20,42	b	
01.VI	ABS - 03-16	08.05.2019 9:40	3,807	6,899	2,82	0,54	0,65	0,66	1,3	0,07	16,19	16,19	b	
01.VII	ABS - 03-17	08.05.2019 9:41	3,807	6,899	2,53	0,51	0,62	0,61	1,2	0,07	15,44	15,44	b	
01.VIII	ABS - 03-18	08.05.2019 9:42	3,807	6,899	3,44	0,71	1,06	1,1	2,2	0,07	26,38	26,38	b	
01.VIII	ABS - 03-19	08.05.2019 9:43	3,807	6,899	3,88	0,93	1,67	1,62	3,2	0,07	41,73	-	P	
01.X	ABS - 03-20	08.05.2019 9:44	3,807	6,899	3,25	0,56	1,31	1,28	2,6	0,07	32,63	-	P	
01.XI	ABS - 03-21	08.05.2019 9:45	3,807	6,899	2,92	0,56	1,36	1,46	2,9	0,07	33,96	-	P	
01.XII	ABS - 03-22	08.05.2019 9:46	3,807	6,899	4,31	0,99	1,37	1,33	2,7	0,07	34,16	-	P	
01.III	ABS - 03-23	08.05.2019 9:47	3,807	6,899	3,33	0,85	1,2	1,18	2,4	0,07	29,89	-	P	
01.IV	ABS - 03-24	08.05.2019 9:48	3,807	6,899	4,26	1,21	1,93	2,02	4	0,07	48,28	-	P	
01.V	ABS - 03-25	08.05.2019 9:49	3,807	6,899	3,26	0,8	1,03	1	2	0,07	25,72	-	P	
01.VI	ABS - 03-26	08.05.2019 9:50	3,807	6,899	4,04	1,16	1,64	1,65	3,3	0,07	40,88	-	P	
01.VII	ABS - 03-27	08.05.2019 9:51	3,807	6,899	2,81	0,39	1,33	1,31	2,6	0,07	33,29	-	P	
01.VIII	ABS - 03-28	08.05.2019 9:52	3,807	6,899	3,3	0,67	0,7	0,63	1,3	0,07	17,44	17,44	b	
01.VIII	ABS - 03-29	08.05.2019 10:00	3,807	6,899	3,21	0,59	0,61	0,56	1,1	0,07	15,16	15,16	b	
01.VIII	ABS - 03-30	08.05.2019 10:01	3,807	6,899	2,07	0,15	0,16	0,16	0,3	0,07	3,88	3,88	b	
01.VIII	ABS - 03-31	08.05.2019 10:02	3,807	6,899	2,39	0,14	0,15	0,18	0,4	0,07	4,79	4,79	b	
01.VIII	ABS - 03-32	08.05.2019 10:03	3,807	6,899	2,92	0,28	0,46	0,42	0,8	0,07	11,49	11,49	b	
01.VIII	ABS - 03-33	08.05.2019 10:04	3,807	6,899	3,41	0,92	1,56	1,57	3,1	0,07	39,09	-	P	
01.VIII	ABS - 03-34	08.05.2019 10:05	3,807	6,899	3,32	0,87	1,57	1,57	3,1	0,07	39,25	-	P	
01.VIII	ABS - 03-35	08.05.2019 10:06	3,807	6,899	3,13	0,64	1,32	1,36	2,7	0,07	32,96	-	P	
01.VIII	ABS - 03-36	08.05.2019 10:07	3,807	6,899	3,47	0,77	1,52	1,52	3	0,07	38,11	-	P	
01.VIII	ABS - 03-37	08.05.2019 10:08	3,807	6,899	4,03	0,94	1,47	1,57	3,1	0,07	36,72	-	P	
01.VIII	ABS - 03-38	08.05.2019 10:09	3,807	6,899	3,38	0,79	1,12	1,13	2,3	0,07	28,02	-	P	
01.VIII	ABS - 03-39	08.05.2019 10:10	3,807	6,899	4,07	0,97	1,82	1,83	3,7	0,07	45,53	-	N	
01.VIII	ABS - 03-40	08.05.2019 10:11	3,807	6,899	3,66	0,97	1,82	1,83	3,7	0,07	45,53	-	N	
01.VIII	ABS - 03-41	08.05.2019 10:12	3,807	6,899	4,05	1,02	1,47	1,46	2,9	0,07	36,67	-	P	
01.VIII	ABS - 03-42	08.05.2019 10:13	3,807	6,899	3,78	1,02	1,47	1,46	2,9	0,07	36,67	-	P	
01.VIII	ABS - 03-43	08.05.2019 10:14	3,807	6,899	4,23	0,94	1,47	1,57	3,1	0,07	36,72	-	P	
01.VIII	ABS - 03-44	08.05.2019 10:15	3,807	6,899	3,48	0,79	1,12	1,13	2,3	0,07	28,02	-	P	
01.VIII	ABS - 03-45	08.05.2019 10:16	3,807	6,899	3,66	0,97	1,82	1,83	3,7	0,07	45,53	-	N	
01.VIII	ABS - 03-46	08.05.2019 10:17	3,807	6,899	4,05	1,02	1,47	1,46	2,9	0,07	36,67	-	P	
01.VIII	ABS - 03-47	08.05.2019 10:18	3,807	6,899	4,23	0,94	1,47	1,57	3,1	0,07	36,72	-	P	
01.VIII	ABS - 03-48	08.05.2019 10:19	3,807	6,899	3,48	0,79	1,12	1,13	2,3	0,07	28,02	-	P	
01.VIII	ABS - 03-49	08.05.2019 10:20	3,807	6,899	3,66	0,97	1,82	1,83	3,7	0,07	45,53	-	N	
01.VIII	ABS - 03-50	08.05.2019 10:21	3,807	6,899	4,05	1,02	1,47	1,46	2,9	0,07	36,67	-	P	
01.VIII	ABS - 03-51	08.05.2019 10:22	3,807	6,899	4,23	0,94	1,47	1,57	3,1	0,07	36,72	-	P	
01.VIII	ABS - 03-52	08.05.2019 10:23	3,807	6,899	3,48	0,79	1,12	1,13	2,3	0,07	28,02	-	P	
01.VIII	ABS - 03-53	08.05.2019 10:24	3,807	6,899	3,66	0,97	1,82	1,83	3,7	0,07	45,53	-	N	
01.VIII	ABS - 03-54	08.05.2019 10:25	3,807	6,899	4,05	1,02	1,47	1,46	2,9	0,07	36,67	-	P	
01.VIII	ABS - 03-55	08.05.2019 10:26	3,807	6,899	4,23	0,94	1,47	1,57	3,1	0,07	36,72	-	P	
01.VIII	ABS - 03-56	08.05.2019 10:27	3,807	6,899	3,48	0,79	1,12	1,13	2,3	0,07	28,02	-	P	
01.VIII	ABS - 03-57	08.05.2019 10:28	3,807	6,899	3,66	0,97	1,82	1,83	3,7	0,07	45,53	-	N	
01.VIII	ABS - 03-58	08.05.2019 10:29	3,807	6,899	4,05	1,02	1,47	1,46	2,9	0,07	36,67	-	P	
01.VIII	ABS - 03-59	08.05.2019 10:30	3,807	6,899	4,23	0,94	1,47	1,57	3,1	0,07	36,72	-	P	
01.VIII	ABS - 03-60	08.05.2019 10:31	3,807	6,899	3,48	0,79	1,12	1,13	2,3	0,07	28,02	-	P	
01.VIII	ABS - 03-61	08.05.2019 10:32	3,807	6,899	3,66	0,97	1,82	1,83	3,7	0,07	45,53	-	N	
01.VIII	ABS - 03-62	08.05.2019 10:33	3,807	6,899	4,05	1,02	1,47	1,46	2,9	0,07	36,67	-	P	
01.VIII	ABS - 03-63	08.05.2019 10:34	3,807	6,899	4,23	0,94	1,47	1,57	3,1	0,07	36,72	-	P	
01.VIII	ABS - 03-64	08.05.2019 10:35	3,807	6,899	3,48	0,79	1,12	1,13	2,3	0,07	28,02	-	P	
01.VIII	ABS - 03-65	08.05.2019 10:36	3,807	6,899	3,66	0,97	1,82	1,83	3,7	0,07	45,53	-	N	
01.VIII	ABS - 03-66	08.05.2019 10:37	3,807	6,899	4,05	1,02	1,47	1,46	2,9	0,07	36,67	-	P	
01.VIII	ABS - 03-67	08.05.2019 10:38	3,807	6,899	4,23	0,94	1,47	1,57	3,1	0,07	36,72	-	P	
01.VIII	ABS - 03-68	08.05.2019 10:39	3,807	6,899	3,48	0,79	1,12	1,13	2,3	0,07	28,02	-	P	
01.VIII	ABS - 03-69	08.05.2019 10:40	3,807	6,899	3,66	0,97	1,82	1,83	3,7	0,07	45,53	-	N	
01.VIII	ABS - 03-70	08.05.2019 10:41	3,807	6,899	4,05	1,02	1,47	1,46	2,9	0,07	36,67	-	P	
01.VIII	ABS - 03-71	08.05.2019 10:42	3,807	6,899	4,23	0,94	1,47	1,57	3,1	0,07	36,72	-	P	
01.VIII	ABS - 03-72	08.05.2019 10:43	3,807	6,899	3,48	0,79	1,12	1,13	2,3	0,07	28,02	-	P	
01.VIII	ABS - 03-73	08.05.2019 10:44	3,807	6,899	3,66	0,97	1,82	1,83	3,7	0,07	45,53	-	N	
01.VIII	ABS - 03-74	08.05.2019 10:45	3,807	6,899	4,05	1,02	1,47	1,46	2,9	0,07	36,67	-	P	
01.VIII	ABS - 03-75	08.05.2019 10:46	3,807	6,899	4,23	0,94	1,47	1,57	3,1	0,07	36,72	-	P	
01.VIII	ABS - 03-76	08.05.2019 10:47	3,807	6,899	3,48	0,79	1,12	1,13	2,3	0,07	28,02	-	P	
01.VIII	ABS - 03-77	08.05.2019 10:48	3,807	6,899	3,66	0,97	1,82	1,83	3,7	0,07	45,53	-	N	
01.VIII	ABS - 03-78	08.05.2019 10:49	3,807	6,899	4,05	1,02	1,47	1,46	2,9	0,07	36,67	-	P	
01.VIII	ABS - 03-79	08.05.2019 10:50	3,807	6,899	4,23	0,94	1,47	1,57	3,1	0,07	36,72	-		

I.57	PETG -a1-5	08.05.2019 10:22	3,807	6,899	50	412,31	2,56	0,55	0,56	0,54	1,1	0,07	14,03	14,03	b
I.58	PETG -a2-1	08.05.2019 10:23	3,807	6,899	50	433,86	2,42	0,52	0,58	0,49	1	0,07	13,16	13,16	b
I.59	PETG -a2-2	08.05.2019 10:26	3,807	6,899	50	458,67	2,44	0,56	0,58	0,54	1,1	0,07	14,38	14,38	b
I.60	PETG -a2-3	08.05.2019 10:27	3,807	6,899	50	436,23	2,33	0,5	0,52	1,49	3	0,07	12,92	12,92	b
01.V	PETG -a2-4	08.05.2019 10:56	3,807	6,899	50	375,23	2,24	0,45	0,45	0,44	0,9	0,07	11,35	-	-
01.VI	PETG S2 5	08.05.2019 10:57	3,807	6,899	50	224,23	0,72	0,06	0,14	0,23	0,5	0,07	3,55	3,55	b
01.VII	PETG S3 1	08.05.2019 10:58	3,807	6,899	50	249,52	1,08	0,1	0,18	0,56	1,1	0,07	4,4	4,4	b
01.VIII	PETG S3 3	08.05.2019 10:58	3,807	6,899	50	243,25	1,15	0,1	0,15	0,23	0,5	0,07	3,78	3,78	b
01.X	PETG S3 4	08.05.2019 10:59	3,807	6,899	50	190,78	1,18	0,09	0,21	0,51	1	0,07	5,13	5,13	b
01.X	PETG S3 5	08.05.2019 10:59	3,807	6,899	50	193,12	0,74	0,06	0,07	0,07	0,1	0,07	1,79	1,79	b
01.XI	PETG S1 1	08.05.2019 11:01	3,807	6,899	50	422,3	4,29	1,16	1,18	1,1	2,2	0,07	29,49	29,49	b
01.XII	PETG S1 2	08.05.2019 11:03	3,807	6,899	50	432,17	3,83	0,93	0,94	0,9	1,8	0,07	23,53	23,53	b
I.13	PETG S1 3	08.05.2019 11:03	3,807	6,899	50	336,34	2,67	0,44	0,45	0,51	1	0,07	11,33	11,33	b
I.14	PETG S1 4	08.05.2019 11:04	3,807	6,899	50	437,89	4,11	0,88	1,32	1,28	2,6	0,07	33,07	33,07	b
I.15	PETG S1 5	08.05.2019 11:04	3,807	6,899	50	294,26	2,81	0,41	0,42	0,42	0,8	0,07	10,47	10,47	b
I.16	PETG S2 1	08.05.2019 11:06	3,807	6,899	50	536,67	4,73	1,65	3,19	3,06	6,1	0,07	79,67	79,67	b
I.17	PETG S2 2	08.05.2019 11:06	3,807	6,899	50	520,01	4,55	1,51	2,36	2,24	4,5	0,07	58,96	58,96	b
I.18	PETG S2 3	08.05.2019 11:07	3,807	6,899	50	484,26	2,44	0,54	0,55	0,54	1,1	0,07	13,75	13,75	b
I.19	PETG S2 4	08.05.2019 11:08	3,807	6,899	50	438,13	2,91	0,51	0,58	0,56	1,1	0,07	14,62	14,62	b
I.20	PETG S2 5	08.05.2019 11:08	3,807	6,899	50	433,57	3,03	0,7	0,71	0,66	1,3	0,07	17,63	17,63	b
I.21	PLA S1 1	08.05.2019 11:11	3,807	6,899	50	574,87	1,91	0,54	0,58	0,56	1,1	0,07	14,61	14,61	b
I.22	PLA S1 2	08.05.2019 11:12	3,807	6,899	50	430,66	1,92	0,44	0,48	0,47	0,9	0,07	11,88	11,88	b
I.23	PLA S1 3	08.05.2019 11:13	3,807	6,899	50	614,52	2,01	0,61	0,73	0,68	1,4	0,07	18,13	18,13	b
I.24	PLA S1 4	08.05.2019 11:13	3,807	6,899	50	620,62	2,88	0,66	0,7	0,63	1,3	0,07	17,6	17,6	b
I.25	PLA S1 5	08.05.2019 11:14	3,807	6,899	50	535,16	1,84	0,5	0,58	0,54	1,1	0,07	14,5	14,5	b
I.26	PLA S2 1	08.05.2019 11:15	3,807	6,899	50	546,26	1,73	0,51	0,54	0,51	1	0,07	13,5	13,5	b
I.27	PLA S2 2	08.05.2019 11:16	3,807	6,899	50	628,29	1,75	0,54	0,57	0,54	1,1	0,07	14,15	14,15	b
I.28	PLA S2 3	08.05.2019 11:17	3,807	6,899	50	564,24	1,74	0,53	0,56	0,51	1	0,07	14,08	14,08	b
I.29	PLA S2 4	08.05.2019 11:18	3,807	6,899	50	587,42	1,92	0,59	0,63	0,59	1,2	0,07	15,79	15,79	b
I.30	PLA S2 5	08.05.2019 11:18	3,807	6,899	50	686,14	1,93	0,53	0,61	0,56	1,1	0,07	15,15	15,15	b
I.31	PLA S3 1	08.05.2019 11:20	3,807	6,899	50	393,61	1,49	0,29	0,46	0,47	0,9	0,07	11,55	11,55	b
I.32	PLA S3 2	08.05.2019 11:20	3,807	6,899	50	397,09	1,75	0,37	0,67	0,9	1,8	0,07	16,69	16,69	b
I.33	PLA S3 3	08.05.2019 11:21	3,807	6,899	50	283,35	0	0	0	0,16	0,3	0,07	0	0	b
I.34	PLA S1 1	08.05.2019 11:22	3,807	6,899	50	584,03	2,02	0,6	0,62	0,59	1,2	0,07	15,56	15,56	b
I.35	PLASIT 2	08.05.2019 11:24	3,807	6,899	50	528,09	1,9	0,49	0,56	0,54	1,1	0,07	14,08	14,08	b
I.36	PLA S1 3	08.05.2019 11:25	3,807	6,899	50	499,36	1,92	0,49	0,51	0,51	1	0,07	12,84	12,84	b
I.37	PLA S1 4	08.05.2019 11:26	3,807	6,899	50	535,16	2,02	0,54	0,61	0,61	1,2	0,07	15,16	15,16	b
I.38	PLA S1 5	08.05.2019 11:26	3,807	6,899	50	532,3	1,9	0,5	0,55	0,51	1	0,07	13,73	13,73	b
I.39	PLA S2 1	08.05.2019 11:29	3,807	6,899	50	540,02	1,7	0,37	0,57	0,54	1,1	0,07	14,23	14,23	b
I.40	PLA S2 2	08.05.2019 11:30	3,807	6,899	50	607,41	1,86	0,55	0,57	0,54	1,1	0,07	14,37	14,37	b
I.41	PLA S2 3	08.05.2019 11:30	3,807	6,899	50	561,99	1,82	0,52	0,54	0,51	1	0,07	13,59	13,59	b
I.42	PLA S2 4	08.05.2019 11:31	3,807	6,899	50	615,19	1,81	0,56	0,6	0,56	1,1	0,07	15,07	15,07	b
I.43	PLA S2 5	08.05.2019 11:31	3,807	6,899	50	634,33	1,76	0,56	0,59	0,54	1,1	0,07	14,74	14,74	b